
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Přírodovědné inženýrství

**Výpočty sdružených úloh napjatosti a proudění
pro rozpukanou horninu**

**Calculations of coupled problems of stress
and flow for fractured rock**

Diplomová práce

Autor:	Bc. Ilona Škarydová
Vedoucí práce:	Doc. Ing. Milan Hokr, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Josef Novák, Ph.D.

V Liberci 27. 5. 2009

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu práce Doc. Ing. Milanu Hokrovi, Ph.D. za cenné rady a konzultace, které mi poskytl při vypracování mé diplomové práce.

Děkuji svým rodičům za jejich podporu a trpělivost, kterou se mnou měli během studia.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá výpočty sdružených úloh napjatosti a proudění v puklinovém prostředí. Samostatně počítáme úlohu napjatosti, výsledky aplikujeme v úloze proudění. Pukliny aproximujeme tzv. měkkým materiálem (což je modelový materiál, jehož modul pružnosti je nižší než modul pružnosti horniny). Materiálové prostředí pukliny umožňuje řešit úlohu s diskontinuitami jako spojitý problém.

Nejprve počítáme úlohu napjatosti na bloku horniny s jednou puklinou (v prostředí Ansys), vyhodnocujeme vliv různých materiálů pukliny (lineárních a nelineárních). Nelineární model se ukazuje jako nejlepší aproximace ze všech uvažovaných. Prostřednictvím změny rozevření pukliny získáme změněnou hydraulickou vodivost, k tomuto účelu bylo nutné vytvořit samostatný skript v Matlabu. Hydraulickou vodivost pak použijeme k výpočtu úlohy proudění (v software Flow123D).

V závěrečné části vyhodnocujeme vliv různého poměru tlaků na změnu šířky pukliny, hydraulickou vodivost a tok horninou. Pro proměnlivé zatížení ze stran se puklina postupně uzavírá. Pokud blok postupně zatěžujeme shora a zdola, nejprve dojde k zúžení, dále se puklina trochu otevírá, což odpovídá reálnému chování rozpukané horniny.

klíčová slova: napjatost, proudění, rozpukaná hornina, Ansys, Flow123D

Abstract

This Diploma Thesis deals with solution of coupled problems of stress and flow for fractured rock. We solve a stress problem separately and then we apply results of this problem to the flow problem. Fractures in the rock are approximated by so-called soft material (it is model material, its Young's modulus is smaller than Young's modulus of the rock). It makes possible to solve discontinuous problem like a continuous problem.

First we solve the stress problem of the rock with one fracture (in software Ansys), we investigate an influence of different kinds of fracture materials (linear and nonlinear). Nonlinear material is the best approximation of all mentioned models. Through the change of fracture aperture we obtain changed hydraulic conductivity. For this purpose it is necessary to create independent script in Matlab. We use hydraulic conductivity for the solution of the flow problem (in software Flow123D).

In the end we investigate an influence of different stress ratio on fracture aperture, hydraulic conductivity and flow through the rock. For variable stress on the sides the fracture gradually closes. For variable stress on foreside and lower side the fracture closes and then it opens again. It agrees with behaviour of the real fractured rock.

keywords: stress, flow, fractured rock, Ansys, Flow123D

Obsah

Prohlášení	3
Poděkování	4
Abstrakt	5
Obsah	6
Seznam použitých symbolů	8
Úvod	9
1 Fyzikální teorie pružnosti a proudění v porézním prostředí	10
1.1 Mechanika pružných těles	10
1.1.1 Vektor posunutí	10
1.1.2 Tenzor deformace	11
1.1.3 Tenzor napětí	12
1.1.4 Hookův zákon	13
1.1.5 Okrajové podmínky	13
1.2 Teorie průsakového proudění	14
1.2.1 Darcyho experiment	15
1.2.2 Hydraulická vodivost	16
1.2.3 Rovnice kontinuity	17
1.2.4 Okrajové a počáteční podmínky	18
1.3 Popis a vlastnosti horninového prostředí a podzemní vody	19
1.3.1 Horninové prostředí	19
1.3.2 Podzemní voda	20
1.3.3 Další pojmy související s prouděním podzemní vody	22
1.4 Numerické metody řešení	22
2 Metodika řešení pro modely rozpukané horniny	24
2.1 Popis modelů rozpukané horniny	24
2.1.1 Aproximace pukliny „měkkým“ materiálem	24
2.2 Okrajové podmínky	25
2.3 Použité softwarové nástroje a výpočetní postupy	25
2.3.1 Ansys	26
2.3.2 Flow123D	27
2.3.3 Realizace přenosu dat Ansys – Flow123D	28
3 2D model horniny s několika puklinami	32
3.1 Vlastnosti modelu	32
3.2 Materiálové vlastnosti	33
3.3 Okrajové podmínky	33
3.4 Výsledky a zhodnocení	34
3.5 Model s puklinou o 10×menším E	34
3.5.1 Pole napětí	34
3.5.2 Pole deformace	34
3.6 Porovnání modelů s různým modulem pružnosti pukliny	36

3.6.1 Celkové posunutí.....	36
3.6.2 Intenzita deformace.....	36
3.6.3 Smykové napětí.....	37
4 2D model horniny s jednou puklinou.....	39
4.1 Úloha napjatosti	39
4.1.1 Popis modelů a materiálové vlastnosti pro úlohu napjatosti	39
4.1.2 Okrajové podmínky pro úlohu napjatosti.....	41
4.1.3 Vyhodnocení úlohy napjatosti.....	43
5 Model proudění, změna rozevření pukliny a hydraulické vodivosti pro různé poměry normálových tlaků.....	51
5.1 Model proudění	51
5.1.1 Popis modelu proudění, okrajové podmínky.....	51
5.1.2 Vyhodnocení modelu proudění	52
5.2 Změna šířky pukliny	53
5.2.1 Lineární materiál pukliny ($E = 4500 \text{ MPa}$, $E = 450 \text{ MPa}$).....	53
5.2.2 Lineární ($E = 15 \text{ MPa}$) a nelineární materiál pukliny	55
5.3 Změna hydraulické vodivosti a toku pro různé poměry tlaků	57
5.3.1 Vyhodnocení	57
Závěr	60
Přílohy	61
Literatura	65

Seznam použitých symbolů

b	šířka pukliny
C_{ijkl}	tenzor elastických modulů
e_{ij}	tenzor malých deformací
E	Youngův modul pružnosti
g	tíhové zrychlení
G	modul pružnosti ve smyku
H	hydraulická výška
k	propustnost
K_{ij}	tenzor hydraulické vodivosti
L	délka porézního prostředí
n	porozita
p	tlak
q	darcyovská rychlost
Q	objemový průtok
S	plocha průřezu porézního prostředí
S_0	specifická storativita
u_i	vektor posunutí
v	rychlost proudění
z	souřadnice ve směru svislé osy
δ_{ij}	Kroneckerovo delta
ε_{ij}	tenzor konečných deformací
μ	dynamická viskozita
ρ	hustota kapaliny
τ_{ij}	tenzor napětí
ϕ	potenciál proudění

Úvod

Sdružené tepelně-hydro-mechanicko-chemické procesy probíhají v hornině a ovlivňují její chování a vlastnosti. Tato práce se zabývá pouze částí, řeší hydro-mechanické procesy, což úzce souvisí s problematikou ukládání vysoce radioaktivních odpadů, která se stává čím dál tím víc aktuální. Tento odpad produkujeme, ale zároveň je třeba jej i zneškodnit, aby neubližoval lidem ani životnímu prostředí. Řešením se zdá být uložení hluboko pod zemský povrch, do speciálních nádob – kontejnerů, do celistvého, neměnného a seizmicky stabilního horninového masivu. Tímto problémem se zabývá spousta států (např. Finsko, Švédsko, Francie, USA) a hledá řešení podle svých možností a přírodních podmínek.

Lidským konáním se však i původně stálé poměry v horninovém masivu mohou změnit, např. vyhloubením tunelů a šachet dochází k jinému rozložení napětí v hornině, kontejner s odpadem produkuje ještě desítky let po vyhoření teplo, lokalitou může proudit voda. Všechny tyto faktory mohou zapříčinit změny v těsnicích materiálech a ovlivňovat napjatost v hornině a vznik puklin. Pukliny by mohly způsobit přenos nebezpečných látek do podzemních vod a tím ohrožení životního prostředí.

Proto je tolik důležité zkoumat sdružené procesy v hornině a změny, které vznikají vlivem napjatosti a proudění. Přitom vycházíme z mezinárodního projektu DECOVALEX zabývající se mimo jiné i problematikou hydro-mechanických procesů. V rámci projektu jsou tyto procesy modelovány speciální numerickou metodou – metodou oddělených elementů, kde je model tvořen samostatnými částmi – oddělenými elementy a chování rozpukané horniny popisují empirické vztahy vycházející z jejího reálného chování.

V této diplomové práci řešíme obdobné, ale zjednodušené úlohy, pomocí jednodušších a dostupnějších prostředků. Puklinu aproximujeme materiálovým prostředím – modelovým „měkkým“ materiálem vycházejícím z materiálu horniny, pouze je jeho modul pružnosti nižší než modul pružnosti horniny. Takto můžeme řešit problém s nespojitostmi jako spojitou úlohu. Odděleně počítáme úlohu napjatosti (pomocí metody konečných prvků v Ansysu) a úlohu proudění (v software Flow123D). Mezi těmito dvěma prostředky je nutné realizovat přenos dat. Proto je nutné vytvořit samostatný skript, který převede pole posunutí do změny šířky pukliny a změněnou šířku na hydraulickou vodivost horniny podle vztahů uvedených v [4]. S touto veličinou už můžeme spočítat úlohu proudění. Vytvoříme obdobnou sadu úloh jako je v rámci projektu DECOVALEX, blok horniny s puklinou s nelineárním modelem materiálu pukliny (s vlastnostmi podle [4], vycházejícími z reálného chování: nižší tuhost pro nižší aplikovaná normálová napětí a vyšší tuhost pro vyšší normálová napětí). Model budeme zatěžovat různými poměry kolmých tlaků a budeme zkoumat změnu šířky pukliny, hydraulické vodivosti a toku horninou v závislosti na předepsaném zatížení.

V úlohách napjatosti popíšeme dílčí výsledky: např. kvalitativní chování horniny (na modelu s více puklinami), velikosti a rozložení tenzoru napětí a deformace (na modelu s jednou puklinou). Vyzkoušíme také vhodnost použití několika lineárních materiálů pro puklinu v porovnání s materiálem nelineárním.

1 Fyzikální teorie pružnosti a proudění v porézním prostředí

V této kapitole uvedeme základní vztahy z teorie pružnosti a proudění v porézním a puklinovém prostředí.

1.1 Mechanika pružných těles

Pružnost je obor mechaniky kontinua, která zkoumá a popisuje rozložení deformace a napětí v pružném tělese vystaveném působení vnějších sil. Kontinuum představuje idealizované prostředí, kde je hmota rozložena spojitě, což v reálném světě přesně neplatí. Přesto můžeme při popisu deformačního chování pevných látek kontinuum uvažovat. V mechanice kontinua připisujeme charakteristické veličiny geometrickým bodům, což fyzikálně představuje průměrnou hodnotu uvažované veličiny z tak velkého okolí bodu, aby se neprojevil nespojitý charakter skutečného prostředí.

Pokud uvažujeme pružné těleso, je možné jeho pohyb rozložit na tři složky:

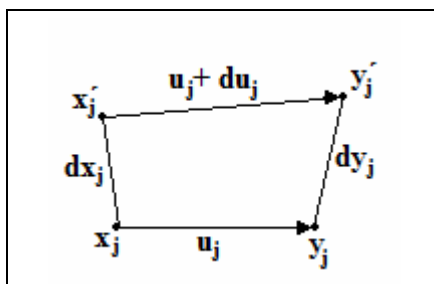
- pohyb translační
- pohyb rotační
- pohyb deformační

Pro mechaniku pružných těles je důležitá třetí složka a popis v této oblasti fyziky zajišťují veličiny vektor posunutí, tenzor napětí a tenzor deformace.

1.1.1 Vektor posunutí

Základní veličinou popisující deformaci tělesa je *posunutí*. Částice o souřadnicích x_i se přemístí do místa o souřadnicích y_i , kde souřadnice $i = 1, 2, 3$ (tři kartézské souřadnice) (toto přiřazení je vzájemně jednoznačné, tzn. že bodu o souřadnicích x_i přísluší právě jeden bod o souřadnicích y_i a naopak). Vektor posunutí u_i , jehož počátek je v místě, kde byl uvažovaný bod na začátku děje a koncový bod v místě konečné polohy částice, je pak dán rozdílem:

$$u_i = y_i - x_i \quad (1)$$



Obr. 1 – Popis deformace pomocí vektoru posunutí

1.1.2 Tenzor deformace

Vektor posunutí v sobě zahrnuje všechny tři složky pohybu (translační, rotační i deformační). Pokud nás zajímá pouze deformace, budeme sledovat změnu vzdálenosti dvou libovolně zvolených bodů \vec{x}_j a \vec{x}'_j , Obr. 1. Bod \vec{x}_j posune do bodu \vec{y}_j a bod \vec{x}'_j do bodu \vec{y}'_j . Indexy j označují indexy bodů, ne souřadnice jako u posunutí popsaného výše. Posunutí mezi těmito dvěma body jsou označena \vec{u}_j , $\vec{u}_j + d\vec{u}_j$, původní vzdálenost mezi body $d\vec{x}_j$, mezi posunutými body $d\vec{y}_j$.

Tenzor konečné deformace ε_{ij} , který můžeme zapsat jako (2), je pak dán vztahem (3):

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

Z jeho charakteru je patrné, že platí $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$, jedná se tedy o symetrický tenzor a obsahuje pouze šest nezávislých složek: tři diagonální a tři mimodiagonální. Pokud uvažujeme pouze malé deformace, tedy že $\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \ll 1$ (pro všechna i, j), což je v praxi běžně splněno, můžeme tenzor (2) označit jako *tenzor malých deformací* e_{ij} a přepsat jako:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

Fyzikální význam jednotlivých složek tenzoru malé deformace:

- $e_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}$, což je relativní prodloužení ve směru osy x_1 , tato vlastnost platí analogicky i pro e_{22} a e_{33}
- složka $e_{12} = e_{21}$ je rovna polovičnímu úhlu smyku mezi osou x_1 a x_2 , tato vlastnost také platí analogicky i pro $e_{12} = e_{21}$ a $e_{13} = e_{31}$

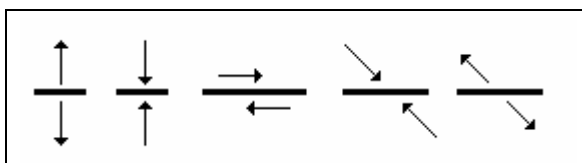
1.1.3 Tenzor napětí

Pokud uvažujeme síly, které na kontinuum působí, způsobuje jejich různá velikost různý stav kontinua, i když je jako celek v rovnováze. Síly v mechanice kontinua klasifikujeme jako: síly *objemové*, které jsou úměrné hmotnosti (resp.objemu) myšlenému elementu kontinua. Mezi objemové síly patří např.síly gravitační. Druhým typem sil jsou síly *plošné*, které charakterizují vzájemné ovlivňování jednotlivých elementů kontinua. Mezi ně patří vektor napětí, z něhož je odvozena další veličina určená pro popis v teorii pružnosti – *tenzor napětí* τ_{ij} , který popisuje silové působení v kontinuu, pro případ uvažované vnitřní plochy. Tenzor napětí lze zapsat jako:

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{bmatrix} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (5)$$

Tenzor napětí, je stejně jako tenzor deformace symetrický, platí tedy $\tau_{ij} = \tau_{ji}$ a tvoří jej šest nezávislých složek. Různé typy napětí jsou zobrazeny na Obr. 2. Pro složky tenzoru napětí platí:

- diagonální složky τ_{11} , τ_{22} , τ_{33} vyjadřují čistě tahové (tlakové) napětí – kladná hodnota napětí znamená napětí tahové, záporné napětí je tlak
- mimodiagonální složky $\tau_{12} = \tau_{21}$, $\tau_{13} = \tau_{31}$ a $\tau_{23} = \tau_{32}$ vyjadřují smyková napětí mezi příslušnými osami



Obr. 2 – Napětí po řadě: čistý tah, čistý tlak, čistý smyk, obecný tlak, obecný tah, viz [6]

Tenzor napětí a tenzor deformace, obecně jakýkoli tenzor, můžeme vyjádřit pomocí tzv. *hlavních směrů* a *hlavních hodnot*. To znamená, že existuje taková transformace souřadnic, pro kterou platí že tenzor obsahuje pouze diagonální složky a mimodiagonální složky jsou nulové. Tyto diagonální složky se nazývají hlavní hodnoty napětí (deformace) a natočení (směry souřadných os) jsou hlavní směry.

1.1.4 Hookův zákon

Vztah mezi deformací a napětím závisí na charakteru materiálu a vyjadřuje ho *Hookův zákon*, který popisuje přímou úměrnost mezi napětím a deformací. Uveden je jeho zobecněný tvar:

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} \quad (6)$$

C_{ijkl} (tenzor 4.řádu) je tenzor elastických koeficientů, který popisuje vlastnosti látky. Obecně má 81 složek, díky symetrii tenzorů napětí a deformace a dalším podmínkám se počet elastických koeficientů pro plně anizotropní látku redukuje na 21. Izotropní látku popisují pouze dva. V teoretických úvahách bývají voleny Laméovy koeficienty λ a μ , v praxi se spíše používají *Youngův modul pružnosti v tahu* E ($E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$) a *modul pružnosti ve smyku* G ($G = \mu$). Použitím těchto konstant

můžeme Hookův zákon zapsat ve tvaru (7) nebo inverzně (8) :

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} e_1 + 2\mu e_{ij} \quad (7)$$

$$e_{ij} = -\frac{\sigma}{E} \delta_{ij} \tau_1 + \frac{1+\sigma}{E} \tau_{ij}, \quad (8)$$

kde

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{pro } i = j \\ 1 & \text{pro } i \neq j \end{cases} \quad \text{Kroneckerovo delta}$$

$$\tau_1 = \tau_{11} + \tau_{22} + \tau_{33} \quad \text{invariant tenzoru napětí}$$

$$e_1 = e_{11} + e_{22} + e_{33} \quad \text{invariant tenzoru deformace}$$

$$\sigma = \frac{\lambda}{2\lambda + \mu} \quad \text{Poissonova konstanta}$$

1.1.5 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky předepisujeme na hranici Γ , ($\vec{x} \in \Gamma$):

- Dirichletova podmínka – předepsaná hodnota posunutí:

$$\vec{u}(\vec{x}) = \vec{u}_D(\vec{x}) \quad (9)$$

- Neumannova podmínka – předepsaná hodnota mechanického napětí:

$$T_i(\vec{x}) = \tau_{ij}(\vec{x}) n_j(\vec{x}) = \lambda e_1 n_i + 2\mu e_{ij} n_j \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (10)$$

- Newtonova podmínka – rozdíl potenciálu uvnitř a vně:

$$T_i(\vec{x}) = \lambda e_1 n_i + 2\mu e_{ij} n_j = \lambda (\vec{u}(\vec{x}) - \vec{u}_V(\vec{x})) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (11)$$

1.2 Teorie průsakového proudění

Průsakové proudění se zabývá prouděním v porézním prostředí. Takové prostředí se skládá z pevného materiálu, který se nazývá matrice a dále z volného prostoru, tzv. pórů. Prostřednictvím těchto pórů a také nejružnějších prasklin a puklin dochází v porézním prostředí k proudění vody.

Podzemní voda proudí z míst dotace (jak přirozené, tak i umělé) k místům odběru. Jedním ze základních vlastností tohoto proudění je malá rychlost, ale protože proudění probíhá ve velkých oblastech, je transportováno velké množství vody.

Při proudění v porézním prostředí se vlivem tření část mechanické energie přemění v energii tepelnou. Mechanickou energii vztaženou na myšlený element udává *potenciál proudění* ϕ , viz vztah (12), který je součtem gravitačního a tlakového potenciálu. *Tlak* p popisuje průměrný tlak v okolí uvažovaného bodu, musíme však vybrat tak velké okolí bodu, abychom zachovali dostatečně reprezentativní objem.

$$\phi = gz + \int_{p_0}^p \frac{1}{\rho} dp, \quad (12)$$

kde

ϕ [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$]	potenciál proudění
z [m]	souřadnice ve směru svislé osy
g [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]	gravitační zrychlení
ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	hustota tekutiny
p [Pa]	tlak tekutiny

Je-li hustota konstantní, jedná se o nestlačitelnou tekutinu a potenciál je roven:

$$\phi = gz + \frac{p - p_0}{\rho}, \quad (13)$$

kde

p_0 [Pa]	tlak tekutiny nulové úrovně, např. atmosferický
------------	--

K proudění vody mezi dvěma body dojde, pokud v každém bodě má hodnota potenciálu proudění různou hodnotu, jinak řečeno voda proudí z míst o vyšší hydraulické výšce do míst s nižší hydraulickou výškou. V úlohách proudění podzemní vody se častěji používá *hydraulická (piezometrická) výška* H [m], jenž je definována jako součet geodetické a tlakové výšky, vztah s potenciálem proudění je:

$$H = \frac{\phi}{g} = z + \frac{p}{\rho g} \quad (14)$$

1.2.1 Darcyho experiment

Henri Darcy publikoval v roce 1856 výsledky svých pokusů s prouděním vody porézním prostředím v 1D, schéma pokusu je zobrazeno na Obr. 3. Porézní prostředí, které je na obrázku zobrazeno tmavě šedě je plně nasyceno vodou a platí, že množství vtékající vody za jednotku času se rovná množství vytékajícímu.

Pokusy byly prováděny s různými druhy porézních materiálů a bylo zjištěno, že množství vody proteklé sloupcem za jednotku času Q je přímo úměrné rozdílu hydraulických výšek $H_1 - H_2$ a ploše průřezu S a nepřímo úměrné délce porézního prostředí L , což vyjadřuje vztah:

$$Q = K \cdot S \frac{H_1 - H_2}{L}, \quad (15)$$

kde

Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

objemový průtok

K [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

hydraulická vodivost

S [m^2]

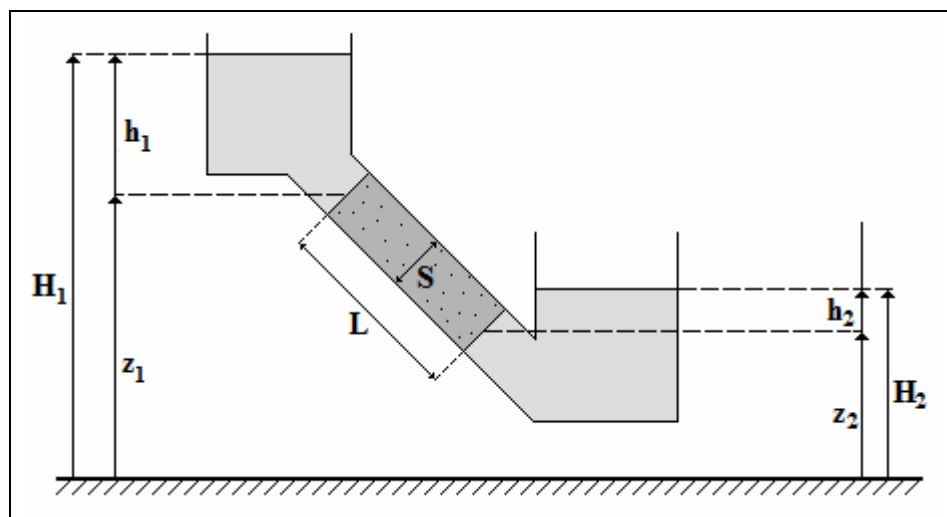
plocha průřezu porézního prostředí

$(H_1 - H_2)$ [m]

rozdíl hydraulických výšek

L [m]

délka porézního prostředí



Obr. 3 – Darcyho experiment

Pokud definujeme plošnou hustotu toku $\vec{q} = \frac{Q}{S}$ s rozměrem [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], kterou nazveme darcyovskou rychlostí, můžeme obecněji pro 3D vyjádřit Darcyho zákon:

$$\vec{q} = -K \text{ grad } H \quad (16)$$

Darcyovská rychlost nevyjadřuje rychlost v pravém slova smyslu, velikost rychlosti částice \vec{v} bychom mohli spočítat podle vztahu:

$$\vec{v} = \frac{\vec{q}}{n}, \quad (17)$$

kde $n = \frac{V_{pórů}}{V_{celk}}$ je porozita horniny (podíl objemu pórů a celkového objemu horniny).

1.2.2 Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost K má tenzorový charakter a závisí jak na vlastnostech proudící kapaliny (hustota a dynamická viskozita), tak na vlastnostech porézního materiálu (zrnitost, tvar zrn a pórů, tortuozita, pórovitost a měrný povrch), které jsou shrnuty do veličiny propustnost. V izotropním materiálu je definován jako hustota toku při jednotkovém hydraulickém gradientu a má rozměr $[m \cdot s^{-1}]$, můžeme jej vyjádřit jako:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}, \quad (18)$$

kde

$K [m \cdot s^{-1}]$	hydraulická vodivost
$k [m^2]$	propustnost
$\rho [kg \cdot m^{-3}]$	hustota kapaliny
$g [m \cdot s^{-2}]$	tíhové zrychlení
$\mu [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$	dynamická viskozita kapaliny

V anizotropních látkách je tenzor hydraulické vodivosti funkcí polohy a směru. Směry, ve kterých hydraulická vodivost dosahuje maximální a minimální hodnoty se nazývají *hlavní směry anizotropie* a jsou na sebe vždy kolmé. Tenzor hydraulické vodivosti je symetrický ($K_{ij} = K_{ji}$), proto nám pro popis anizotropního materiálu v prostoru stačí šest jeho složek vztah (19), pro úlohy v rovině stačí složky tři. Jestliže jsou osy souřadného systému rovnoběžné s hlavními směry anizotropie, pak má tenzor hydraulické vodivosti nenulové pouze diagonální členy.

Význam jednotlivých členů tenzoru hydraulické vodivosti je následující: např. K_{12} znamená příspěvek v hustotě toku q_1 ve směru osy x_1 vyvolaný jednotkovým hydraulickým gradientem ve směru osy x_2 .

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (19)$$

Pro obecný anizotropní materiál můžeme Darcyho zákon zapsat jako:

$$\begin{aligned}\vec{q}_1 &= -K_{11} \frac{\partial H}{\partial x_1} - K_{12} \frac{\partial H}{\partial x_2} - K_{13} \frac{\partial H}{\partial x_3} \\ \vec{q}_2 &= -K_{21} \frac{\partial H}{\partial x_1} - K_{22} \frac{\partial H}{\partial x_2} - K_{23} \frac{\partial H}{\partial x_3} \\ \vec{q}_3 &= -K_{31} \frac{\partial H}{\partial x_1} - K_{32} \frac{\partial H}{\partial x_2} - K_{33} \frac{\partial H}{\partial x_3}\end{aligned}\quad (20)$$

1.2.3 Rovnice kontinuity

Darcyho zákon vyjadřuje pohybovou rovnici pro proudění v porézním prostředí. Protože obsahuje dvě závislé proměnné ($\vec{q}(x_1, x_2, x_3, t)$ a $H(x_1, x_2, x_3, t)$), potřebujeme k úplnému popisu proudění ještě jednu rovnici – zákon zachování hmoty, který reprezentuje rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial \rho n}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \rho v_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \rho v_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} \rho v_3 \right), \quad (21)$$

kde

n [-]	porozita
v_i ($i = 1, 2, 3$)	složky vektoru rychlosti

Po úpravách rovnici kontinuity můžeme přepsat do tvaru se specifickou storativitou:

$$\rho S_0 \frac{\partial H}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \rho v_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \rho v_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} \rho v_3 \right), \quad (22)$$

kde S_0 [m^{-1}] označuje specifickou storativitu (zásobnost) porézního prostředí, což je parametr, který vyjadřuje schopnost horninového prostředí vydávat či přijímat vodu při změně hydraulické výšky.

Pro nestlačitelnou kapalinu ($\rho = konst.$) má rovnice kontinuity tvar vyjadřující vztah (23), jinak lze zapsat vztahem (24). Je-li i pórovitost porézního prostředí konstantní ($n = konst.$), můžeme rovnici kontinuity zjednodušit na vztah popisující ustálený stav:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \rho v_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \rho v_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} \rho v_3 \right) \quad (23)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -div \vec{v} \quad (24)$$

$$div \vec{v} = 0 \quad (25)$$

1.2.4 Okrajové a počáteční podmínky

Pro úplný popis proudění potřebujeme také zadat okrajové podmínky, v případě nestacionárního proudění i počáteční podmínky. Dále uvedená funkce $f(x_1, x_2, x_3, t)$ u předpisu okrajové nebo počáteční podmínky je vždy známou funkcí.

Počáteční podmínka vyjadřuje velikost hydraulické výšky v uvažované oblasti v čase $t = 0$:

$$H = f(x_1, x_2, x_3, 0) \quad (26)$$

Okrajové podmínky můžeme zadat různými způsoby:

- Dirichletova podmínka – hranice s předepsanou hodnotou hydraulické výšky, tato okrajová podmínku může být stacionární i nestacionární (závislá na čase) a vyskytuje se vždy tam, kde je oblast proudění ve styku s otevřenou volnou hladinou (řeka, jezero):

$$H = f(x_1, x_2, x_3, t) \quad (27)$$

- Neumannova podmínka – hranice s předepsaným tokem, známe tok ve směru kolmém na hranici (viz vztah (28)), speciálním případem této okrajové podmínky je nepropustná hranice.

$$v_n = f(x_1, x_2, x_3, t) \quad (28)$$

- Newtonova podmínka – polopropustná hranice. Tato okrajová podmínka se používá tam, kde je oblast proudění v kontaktu s otevřeným vodním zdrojem, ale je oddělena polopropustnou vrstvou, kde H je hodnota hydraulické výšky uvnitř oblasti, H_0 hodnota hydraulické výšky vně oblasti a c je odpor vrstvy:

$$v_n = \frac{H - H_0}{c} \quad (29)$$

- Volná hladina – tvar volné hladiny podzemní vody není předem známý, tedy neznáme hranici řešené oblasti a hodnoty hydraulické výšky na této hranici. Tento problém se řeší iteračním způsobem řešení.
- Výronová plocha – výronovou plochou voda vystupuje na povrch a volně po ní stéká. V tomto případě známe tvar hranice, neznáme však bod, kterým voda vytéká.

1.3 Popis a vlastnosti horninového prostředí a podzemní vody

1.3.1 Horninové prostředí

Prostředí pod zemským povrchem, kterým se zabýváme je tvořeno horninami. Hornina je nahromaděním minerálních substancí a podílí se na složení zemské kůry. Hornina se může skládat z jednoho minerálu (monominerální), nebo z více minerálních složek. Podle toho, jak horniny vznikly se rozdělují na:

- magmatické (vyvřelé)
- sedimentární (usazené)
- metamorfované (přeměněné)

Horniny tvoří pod zemským povrchem rozsáhlé útvary – horninové masivy, které však nemusí být úplně celistvé. Obsahují nejrůznější diskontinuity (zlomy, trhliny a pukliny). Studium stavby horniny a rozmístění těchto nespojitostí hraje velkou roli v chování horniny jako celku (ovlivňuje mechanické a hydrogeologické vlastnosti).

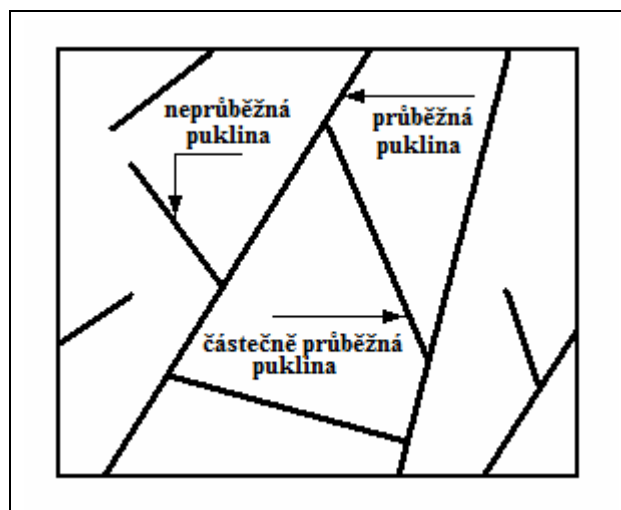
Trhliny, podél nichž nastal v hornině výrazný pohyb (obvykle ukloněný), se nazývají zlomy nebo dislokace. Zlomy mohou být dlouhé od několika metrů po desítky až stovky kilometrů a oddělují útvary nazývané kry. Dislokace se dále klasifikují podle orientace, podle úklonu zlomových ploch, podle pohybu ker,...

Pukliny jsou trhliny v hornině, s poměrně malým rozsahem, podél nichž nedošlo k pohybu. Způsobují rozpukání hornin a vyskytují se v menší hustotě. Podle původu vzniku dělíme pukliny na primární a sekundární.

- primární (vzniklé při tvorbě horniny)
 - odlučné (vzniklé smrštěním při tuhnutí magmatitů)
 - desikační (vzniklé smrštěním při vysychání sedimentů)
- sekundární (vzniklé už v hotové hornině)
 - tektonické (vzniklé účinky tektonických sil, které mohou být tahové, tlakové, diagonální)

Pukliny se z kvalitativního hlediska dělí podle celé řady hledisek, některé z nich zde uvedeme.

- podle průběžnosti (viz Obr. 4)
- podle kvality povrchu (drsne, vyhlazené, hladké)
- podle tvaru povrchu (rovinné, zvlněné, stupňovité)
- podle zvodnění
- podle výplně (volné, povlečené, zaplněné, zhojené)
- podle rozevření (viz Tab. 1, viz [14])



Obr. 4 – Klasifikace puklin podle průběžnosti

Tab. 1 – Rozevření puklin (podle ČSN EN ISO 14689-1/2004)

Popisný termín	Termín pro velikost rozevření	Rozevření [mm]
Uzavřené (sevěřené)	velmi těsné	< 0,1
	Těsné	0,1 až 0,25
	Částečně otevřené (pootevěřené)	0,25 až 0,5
Otevřené	Otevřené	0,5 až 2,5
	Nepříliš široké	2,5 až 10
	Široké	> 10
Rozevřené (zející)	Velmi široké	10 až 100
	Extrémně široké	100 až 1000
	Kavernózní (dutinové)	> 1000

1.3.2 Podzemní voda

Voda, která se nachází pod zemským povrchem, se souhrnně označuje termínem podpovrchová voda. Její část obsažená v saturované zóně půdních a geologických celků je voda podzemní. Voda se pod zemský povrch dostává pomocí srážek (vadózní voda, viz [13]), část srážek odtéká po povrchu, část se odpaří, část se infiltruje pod povrch. Dalším typem vody, která se nachází v horninových celcích je tzv. voda juvenilní (viz [13]), která vzniká při magmatických a metamorfních procesech. Pod povrchem se voda vlivem gravitace dostává až k nepropustnému podloží, kde se stává součástí podzemního proudění. Podle prostředí, kterým prostředím voda prochází se dělí na skalní vlhkost, vodu průlinovou a puklinovou.

- **Skalní vlhkost** je vázána molekulárními silami k povrchu minerálů a vyplňuje drobné dutiny a póry. Odstranit lze pouze zahřátím, ovlivňuje vlastnosti hornin (např. pevnost).
- **Průlinová voda** se vyskytuje v inetergranulárních prostorech, nejčastěji v píscích a štěrcích. Jílovité sedimenty průlinovou vodu téměř nepropouští. Tato voda je volně pohyblivá, prostupem horninou se filtruje. Hladina průlinové vody může značně kolísat, např. díky dešťovým srážkám.
- **Puklinová voda** se vyskytuje v horninách, které jsou pro průlinovou vodu prakticky nepropustné. Pukliny a trhliny v takových horninách tvoří hlavní cesty, kterými se voda dostává pod povrch. Tato voda se nevyskytuje ve zcela spojitých systémech.

Pokud jsou v určité oblasti všechny póry nasyceny vodou jedná se o tzv. saturovanou zónu, která je shora ohraničena volnou hladinou (hladina na níž je tlak roven atmosferickému). Pokud je část pórů naplněna vzduchem či vodními parami, zóna je nesaturovaná. Pásmo, kde nesaturovaná zóna přechází k hladině podzemní vody, se dá rozdělit na tři oblasti: pásmo půdní vody, přechodná oblast a pásmo kapilární vody.

- **Pásmo půdní vody** – na vlhkost v této zóně mají vliv jak podmínky na povrchu, tak hladina podzemní vody pokud se nachází blízko u povrchu. Pásmo půdní vody odpovídá hloubce kořenového systém rostlin. Voda se pohybuje směrem dolů při infiltraci a směrem nahoru při transpiraci a v půdě je obsažena jako voda kapilární a hygroskopická.
- **Přechodná oblast** – tloušťka této zóny závisí na hladině podzemní vody a její dolní hranice odpovídá horní hranici kapilární vody. V přechodném pásmu můžeme nalézt vodu pohyblivou (hygroskopická, kapilární) i nepohyblivou (gravitační).
- **Pásmo kapilární vody** – dolní hranici tohoto pásma určuje hladina podzemní vody a její výška závisí na kapilárních silách, které jsou určeny velikostí pórů zeminy (pro jílovité materiály dosahuje pásmo kapilární vody i několik metrů), proto není hranice pásma kapilární vody pravidelná.
- **Pásmo podzemní vody** – patří do saturovaného pásma a zde proudící voda patří mezi vody gravitační (vody, které se pohybují vlivem gravitace).

1.3.3 Další pojmy související s prouděním podzemní vody

- **kolektor** – horninové prostředí, ve kterém se voda může pohybovat snadněji oproti okolnímu horninovému prostředí, protože jeho propustnost je mnohonásobně vyšší než propustnost okolí.
- **hydrogeologický izolátor** – oblast s nižší propustností, která odděluje jednotlivé kolektory, ve skutečnosti jsou hydrogeologické izolátory polopropustné a do určité míry dovolují vodě protékat mezi kolektory.
- **zvodeň** – vodní útvar, který tvoří podzemní voda v kolektoru.
- **kolektor s napjatou hladinou** – kolektor, který je shora i zdola omezený nepropustným prostředím a nachází se častěji ve větších hloubkách pod zemským povrchem. Pokud bychom měli studnu, která odvodňuje tuto oblast, hladina vody v ní by dosahovala nad úroveň celého kolektoru a odpovídala by hydraulické výšce v tomto místě. Pokud hladina dosahuje nad úroveň terénu, říkáme tomuto kolektoru **artézský kolektor**.
- **kolektor s volnou hladinou** – v této oblasti se tvoří hladina podzemní vody. Zvodeň s volnou hladinou je shora ohraničená hladinou podzemní vody.

1.4 Numerické metody řešení

K simulaci a řešení problémů existují různé druhy numerických metod, každá má své výhody i omezení a každá se hodí k řešení jiného druhu problémů. V této kapitole uvedeme stručný popis jednotlivých metod a jejich nejčastější použití a souvislosti se softwary, pomocí kterých jsme prováděli výpočty.

- **Metoda konečných diferencí (FDM)** – v této metodě hledáme přibližné řešení diferenciální rovnice použitím diferencí, které aproximují derivace. Diskretizace v prostoru se provádí konstrukcí sítě, která musí být strukturovaná (nejčastěji se používá pravoúhlá), která umožňuje očíslování jednotlivých bodů sítě.

Existuje několik druhů numerických schémat pro aproximaci derivací diferenčními vzorci a odvozují se pomocí Taylorova rozvoje derivace (centrální, jednostranné). Např. pro konvekčně-difúzní rovnice je pro každý jev vhodné jiné schéma. Pro diskretizaci v čase se používá buď dopředné, nebo zpětné schéma. S tím souvisí schéma explicitní a implicitní v čase. Explicitní schéma nám umožňuje získat řešení v čase $t + 1$ ze znalosti hodnot v čase t . Implicitní schéma je komplikovanější z hlediska řešení, protože musíme řešit soustavu algebraických rovnic, jelikož se hledaná časová hladina vyskytuje ve více členech rovnice (vždy lineární rovnice).

Zahrnutí okrajových podmínek obvykle není problém, protože buď známe přímo hodnotu v krajním uzlu, nebo máme jednoduchou rovnici. Výsledkem metody sítí jsou diskrétní hodnoty přiřazené jednotlivým uzlům sítě.

- **Metoda konečných prvků (FEM)** – další numerická metoda, ve které spojité prostředí diskretizujeme na konečný počet menších částí – prvků, kterými mohou být různé rovinné nebo prostorové útvary. Touto metodou lze řešit parciální diferenciální rovnice i rovnice integrální. Formulujeme slabé řešení a hledanou spojitou funkci na každém elementu nahradíme diskrétní báзовou funkcí. Slabé řešení nalezneme jako minimum určitého funkcionálu. Po těchto krocích dostaneme soustavu lineárních rovnic, kterou je možné snadněji vyřešit.

Tato metoda je implementována ve spoustě komerčních softwarů (Pro-Engineer, Ansys, ABAQUS, MARC) a lze ji využít k výpočtům mnoha fyzikálních problémů. Často se využívá k výpočtu úloh pružnosti, akustiky, elektromagnetismu, tepla,... Výhodou FEM je díky diskretizaci možnost výpočtu geometricky složitých úloh. V této práci je metoda konečných prvků využita v rámci výpočtů úloh pružnosti v systému Ansys.

- **Metoda konečných objemů (FVM)** – metoda, která se používá pro rovnice v konzervativním tvaru. Oblast řešení je opět diskretizována, tentokrát na konečné objemy. Vlastnost nestrukturované sítě má společnou s FEM, opět používáme aproximaci báзовými funkcemi a hledáme minimum funkcionálu. Metoda konečných objemů v 1D pro vhodně zvolené konečné objemy přechází v řešení metody konečných diferencí. FVM se nejčastěji užívá k výpočtu úloh proudění (konvečně-difúzních rovnic).

- **Metoda oddělených elementů (DEM)** – speciální sada numerických metod, které jsou zobecněním FEM a používají se k výpočtu hydromechanických procesů, zvláště v rozpukané hornině (viz [3], [4]). Mezi další aplikace patří výpočet pohybu menších částic jako je pohyb molekul nebo zrněk písku. Princip této metody vysvětlíme na modelu rozpukané horniny. DEM spočívá ve vytvoření speciální sítě, která se skládá ze samostatných – oddělených elementů reprezentujících rozpukanou horninu. Chování horniny je popsáno empirickými vztahy, v [3] je použit nelineární modul pružnosti rozpukané horniny, nelineární závislost normálového tlaku na rozevření pukliny. Výpočet metodou oddělených elementů má několik fází: vytvoření geometrie (tvorba oddělených elementů), aplikace mechanických okrajových podmínek a aplikace okrajových podmínek pro proudění na zatížený model.

2 Metodika řešení pro modely rozpukané horniny

Tato kapitola by měla uvést, popsat a vysvětlit základní myšlenku aproximace modelů horniny s puklinami. Bude zde charakterizováno nahrazení pukliny „měkkým“ materiálem, uložení a zatížení a také důvody volby tohoto modelu a jeho možné výhody či nevýhody. Pro přehlednost je problematika uvedena v samostatné kapitole, kterou budeme využívat a budeme se na ni dále odkazovat.

2.1 Popis modelů rozpukané horniny

Jako nejvýhodnější z hlediska vytvoření geometrie modelu se ukázala aplikace 2D modelu. Aproximovali jsme 3D blok horniny s nekonečným rozměrem v horizontálním směru kolmým čtvercovým řezem. Důvodem je již zmíněné jednodušší vytváření geometrie, ale také menší počet elementů a tím i rychlejší výpočetní čas.

Z geometrického hlediska je tedy model ve tvaru čtverce, puklina je nahrazena také 2D objektem. Pokud jde o model s jednou puklinou, představuje puklinu kosodélník, jestliže máme v úloze puklin více, nahradíme je složitějším rovinným útvarem.

2.1.1 Aproximace pukliny „měkkým“ materiálem

Ve skutečnosti je puklina volným prostorem v hornině a žádný materiál se v ní nenachází. Ale důvodů, proč je puklina aproximována „měkkým“ materiálem je hned několik. Díky materiálovému prostředí pukliny snadněji poznáme, jaké napětí uvnitř pukliny působí, lépe určíme k jakým posunutím a deformacím v modelu dochází. Ale hlavním argumentem, proč puklině přiřazujeme materiál je aproximace nespojitě úlohy úlohou spojitou. Reálně totiž máme části rozpukané horniny, které v modelu nahradíme taktéž samostatnými bloky, spojíme je však puklinami s rozdílným materiálovým prostředím oproti hornině. V modelu tedy nespojitosti máme, ale vzhledem k tomu, že tloušťka pukliny je oproti velikosti modelu velmi malá, tyto nespojitosti model nijak zvlášť negativně neovlivňují.

Jako materiál horniny je použit granit, jehož fyzikální vlastnosti popisuje Tab. 2. Puklina je v různých úlohách aproximována dvěma typy materiálů. Použit je buď materiál nazvaný Puklina 1, nebo materiál Puklina 2 (viz Tab. 2). Tyto dva materiály mají stejnou Poissonovu konstantu jako hornina, liší se Youngovým modulem pružnosti. Modul pružnosti materiálu Puklina1 je 10×menší než modul

pružnosti horniny, činí 4500 MPa. Materiál Puklina 2 je charakterizován Youngovým modulem pružnosti 100×nižším než je modul pružnosti horniny, jeho velikost je tedy 450 MPa. Dále jsou použity další dva materiálové modely, jeden lineární, druhý nelineární. Jejich popis bude upřesněn až v odpovídající části textu.

Tab. 2 – Fyzikální vlastnosti granitu a pukliny

Materiál	E [MPa]	μ	Hustota [kgm⁻³]
Granit	45000	0,23	2700
Puklina 1	4500	0,23	2700
Puklina 2	450	0,23	2700

2.2 Okrajové podmínky

V modelech s puklinami jsme vyzkoušeli několik typů okrajových podmínek, protože jsme potřebovali nalézt takové upevnění, které by co nejméně ovlivňovalo vnitřek pukliny a tak i celý model.

Okrajové podmínky se liší zejména uložením a skutečností, zda na model působí tíhové pole Země nebo ne. Pokud na model, aplikujeme zatížení, které odpovídá působení tíhového pole, jsou rozdíly mezi tlakovou silou, která působí shora, a tlakovou silou zdola, minimální. Velikost obou těchto sil je v řádu desítek MPa a rozdíl mezi nimi asi o tři řády nižší. Pro korektní zadání je však tento rozdíl velice důležitý. Ale protože použijeme model o velikosti 12 m, nakonec mezi těmito dvěma modely takový rozdíl není a můžeme použít i model bez tíhového pole, aniž by se příliš lišil od modelu s tíhovým polem.

Upevnění v modelech vždy volíme uměle, potřebujeme totiž statickou úlohu bez stupňů volnosti. Pokud se modely odlišují upevněním, různé není jen místo upevnění, ale i skutečnost jsou-li zařazovány celé strany, nebo jen vrcholy čtverce představující blok horniny. Konkrétní použité okrajové podmínky a jejich výhody či nedostatky jsou vždy uvedeny a popsány v příslušných kapitolách.

2.3 Použité softwarové nástroje a výpočetní postupy

K výpočtům jsme v této práci použili několik softwarových nástrojů, dva hlavní zmíníme v samostatných podkapitolách. Úlohy napjatosti jsou spočteny v Ansysu a k výpočtům úloh proudění byl použit Flow123D. Dílčí výpočty jsou provedeny pomocí Matlabu a využit byl i postprocessorový modul programu GMSH.

Základním principem vyhodnocování změny hydraulické vodivosti horniny s puklinou je výpočet úlohy napjatosti v Ansysu, díky němuž dostaneme pole posunutí. Získané hodnoty vektoru posunutí uzlů pukliny je třeba transformovat do změny šířky pukliny a následně do změny hydraulické vodivosti horniny. Tu již můžeme použít pro výpočet pole proudění v programu Flow123D. Výše zmíněné kroky jsou popsány v samostatných kapitolách.

2.3.1 Ansys

Všechny úlohy napjatosti jsme simulovali pomocí komerčního konečně-prvkového softwarového nástroje Ansys, který je určen k řešení celé škály problémů z nejrůznějších oblastí (strukturální, elektrické, teplotní, akustické a některé sdružené procesy). V Ansysu je možné řešit stacionární i nestacionární úlohy, lineární i nelineární problémy (jak geometricky, tak fyzikálně), možná je i formulace kontaktních úloh se speciálními elementy umístěnými na interagujícím rozhraní.

Všechny modely v Ansysu jsou sestaveny ve speciálním jazyku APDL (ANSYS Parametric Design Language), který umožňuje parametrické definice geometrie modelu, okrajových podmínek a zatížení. Tím jsme získali efektivnější přístup z hlediska přetváření a pozměňování modelu, které je mnohem snadnější než při práci přes grafické rozhraní. Příloha B obsahuje ukázkou skriptu s výpočtem zatíženého modelu horniny s jednou puklinou (viz kapitola 4).

Postup řešení úlohy v Ansysu je stručně uveden v následujících bodech, v závorkách je upřesněna konkrétní volba pro výpočty úloh napjatosti:

- Preprocessing:
 - zadání typu analýzy (strukturální)
 - výběr elementu podle typu řešené úlohy
 - zadání geometrie úlohy
 - zadání materiálových vlastností
 - vygenerování sítě konečných prvků
 - zadání počátečních a okrajových podmínek
 - další možná nastavení (úlohy jsou řešeny v režimu „rovinná deformace“)
- Vyřešení úlohy:
 - samotný výpočet

- Postprocessing:
 - vyhodnocení výsledků
 - grafické zobrazení modelu se zvolenou veličinou v barevné škále
 - vygenerování grafů
 - získání výstupních datových souborů pro další zpracování

Výstupem z programu Ansys jsou tabulky hodnot určité veličiny (složky vektoru posunutí, složky tenzoru napětí či deformace, intenzita napětí a intenzita deformace a další), příslušící uzlům modelu. Tyto hodnoty si můžeme zobrazit buď přímo jako tabulku čísel, nebo graficky jako barevný obrázek se škálou hodnot. Samotná tabulka hodnot v uzlech je vhodná, jestliže potřebujeme bodové hodnoty, pokud sledujeme model jako celek, je lepší použít grafické zobrazení hodnot v barevné škále. Možné je automatické i manuální nastavení škály, případně vyhodnocování v transformovaném souřadném systému. Soubory s tabulkami hodnot vektoru posunutí a seznamy jednotlivých elementů a uzlů s příslušnými souřadnicemi jsme si vyexportovali jako samostatné soubory pro transformaci a další zpracování.

2.3.2 Flow123D

Pole proudění pro zatížený model s puklinou (model, pro který jsme spočítali úlohu napjatosti v Ansysu) je počítáno v softwaru Flow123D. Tento program byl vyvinut na TUL pro simulaci úloh proudění a transportu v porézním a puklinovém prostředí. Pro úlohy v této práci je využito výpočtu pole proudění bez transportu.

Základní postup při simulaci v tomto programu odpovídá klasickému procesu modelování, který je již zmíněn u kapitoly popisující modelování v Ansysu. Jeho kroky tedy jsou: preprocessing, výpočet úlohy a postprocessing. Rozdílem je, že k programu Flow123D přistupujeme pomocí speciálních souborů, které musí mít přesně danou strukturu. Pro výpočty v tomto programu jsou nutné následující vstupní soubory:

- ***.ini** (inicializační soubor, zde jsou zapsány všechny vstupní soubory potřebné k výpočtu, nastavení parametrů řešiče, výstupní soubory a další možná nastavení jako: transport, sorpce, dvojí porozita...)
- ***.msh** (sít' modelu: definice jednotlivých uzlů a jejich souřadnic, definice elementů modelu, jejich tvaru, příslušnost elementů k jednotlivým materiálům)

- ***.ngh** (popis, které elementy spolu sousedí a způsob, jakým spolu sousedí, tento soubor se generuje externě ze souboru se sítí modelu)
- ***.mtr** (definice jednotlivých materiálů použitých v modelu, základem je hydraulická vodivost pro jednotlivé materiály, případně koeficienty pro sorpci, storativitu,...)
- ***.fbc** (definice okrajových podmínek: typ okrajové podmínky, entita, na kterou je předepsána a hodnota okrajové podmínky)

Geometrická síť pro modely proudění počítané ve Flow123D byla použita stejná jako v úlohách napjatosti v Ansysu. Jednotlivé uzly a elementy se však musely transformovat do formátu souboru *.msh. Tato transformace byla provedena pomocí samostatného skriptu vytvořeného v Matlabu. Tento skript zároveň realizuje transformaci pole posunutí do změny šířky pukliny a následně do změny hydraulické vodivosti pukliny. Tuto materiálovou vlastnost zapíše do souboru ve formátu *.mtr. Pro vytváření souboru *.ngh a souboru s okrajovými podmínkami *.fbc fungují v rámci Flow123D generátory, pro které je třeba mít připraven soubor se sítí *.msh.

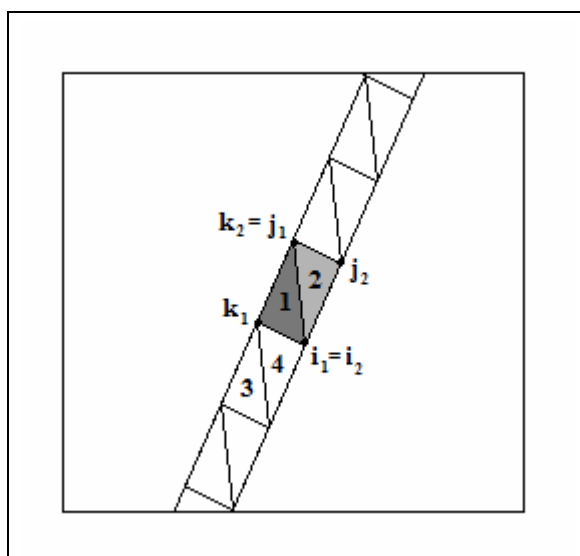
V nastavení výstupních souborů si můžeme zvolit, které veličiny budeme chtít zobrazovat a hodnotit, zároveň jsou tyto soubory ve formátu *.pos, a proto si je můžeme snadno spustit a prohlédnout v programu GMSH.

2.3.3 Realizace přenosu dat Ansys – Flow123D

V této části textu je popsána transformace dat z programu Ansys do programu Flow123D. Jak bylo řečeno výše, ze simulace úlohy napjatosti jsme získali pole posunutí, díky němuž můžeme vypočítat, jak se změní rozevření pukliny. Ze změněné šířky pukliny se dá snadno zjistit hydraulická vodivost horniny, kterou použijeme pro výpočty ve Flow123D. Protože formát výstupů z Ansysu nevyhovuje formátu vstupních souborů potřebných pro výpočet ve Flow123D a zároveň potřebujeme provést výše zmíněnou transformaci veličin, bylo třeba vytvořit samostatný skript, který tuto transformaci realizuje.

Skript je sestaven v Matlabu a provádí všechny zmíněné dílčí výpočty. Vstupem do programu jsou dva soubory, které jsme vyexportovali z Ansysu. První soubor obsahuje seznam uzlů modelu s příslušnými souřadnicemi a posunutím ve směru jednotlivých souřadných os. Druhý vstupní soubor zahrnuje seznam elementů a uzly, které těmto elementům přísluší.

Příloha A obsahuje tento skript, pomocí kterého počítáme změnu rozevření pukliny a na základě rozevření i materiál pukliny pro proudový model. Algoritmus je pro jednoduchost aplikován na modelech s jednou puklinou a podle toho je i sestaven. Aby program fungoval správně je nutné, aby elementy v puklině měli přesně definovaný tvar. Tohoto pravidla jsme se museli držet již při vytváření geometrie modelu v Ansysu. Elementy musí mít tvar pravoúhlého trojúhelníku a v puklině musí být umístěny podle Obr. 5, kde je zobrazen blok horniny se zvětšenou puklinou. Prvotní úsilí směřovalo k výpočtu změny šířky pro puklinu s obecnými trojúhelníkovými elementy. Tato cesta se však brzy ukázala jako příliš komplikovaná z hlediska výběru správných uzlů elementu, tak jsme raději zvolili přesně definované elementy. Na nich je výběr snadnější a zároveň není problém v Ansysu takové elementy nadefinovat.

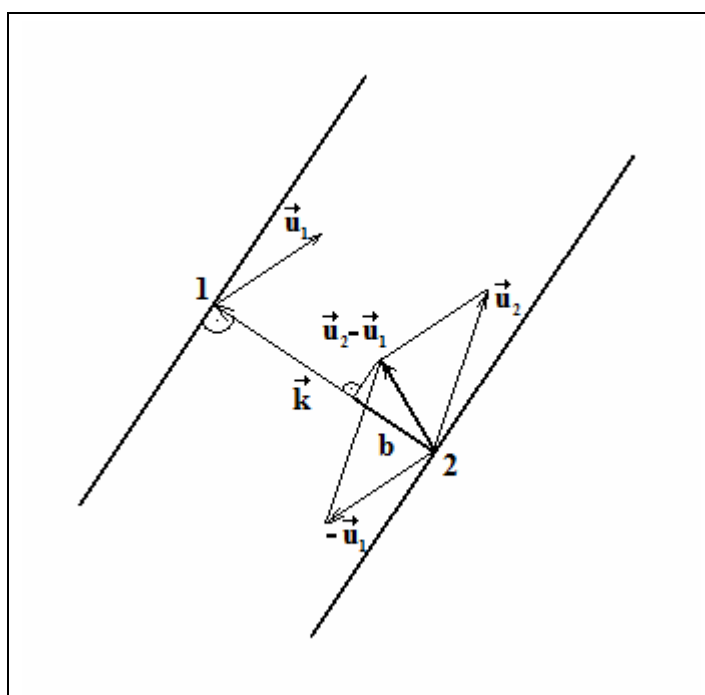


Obr. 5 – Tvar elementů pukliny

Algoritmus je založený na tom, že vyhledá uzly jednoho elementu, které leží naproti sobě v puklině. Toto vyhledávání se dá lépe popsat pomocí Obr. 5 se zvětšenou částí pukliny. Elementy v puklině mají takový tvar, že nedovolují vybrat špatnou dvojici uzlů a jsou očíslovány podle obrázku, pro jednoduchost budeme při vysvětlení principu vyhledávání uvažovat, že element uprostřed pukliny je očíslován jako element 1, i když ve skutečnosti tomu tak není. Pro celou puklinu ale platí, že elementy v puklině více vlevo mají pořadové číslo liché a elementy více vpravo sudé. Uzly všech elementů jsou vždy ve výstupním souboru z Ansysu seřazeny v pořadí i_m, j_m, k_m , kde $m = 1, 2, 3, \dots$, jak je uvedeno na obrázku. Proto pro elementy s lichým

pořadovým číslem (pro liché m) platí, že uzly proti sobě v puklině jsou uzly j_m a k_m a pro elementy se sudým pořadovým číslem pak platí, že požadované uzly jsou i_m a k_m .

Tak máme připravenou správnou dvojici uzlů elementu, na které dále počítáme změnu šířky pukliny. Princip určení změny rozevření pukliny spočívá v určení rozdílu průmětů vektorů posunutí uzlů ležících v puklině naproti sobě. Vysvětlení na Obr. 6: nejprve od sebe odečteme vektory posunutí jednotlivých uzlů, na výsledném vektoru pak provedeme průmět do směru normály na puklinu. Výpočet je proveden podle vztahu (30).



Obr. 6 – Výpočet změny šířky pukliny

$$\Delta b = \frac{\vec{u}_2 - \vec{u}_1}{\|\vec{k}\|} \cdot \vec{k} = \frac{(u_{2x} - u_{1x})k_x + (u_{2y} - u_{1y})k_y}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}, \quad (30)$$

kde

Δb [m]	změna šířky pukliny
\vec{u}_1	vektor posunutí uzlu 1
\vec{u}_2	vektor posunutí uzlu 2
\vec{k}	normála k puklině (určena uzly 1 a 2)
$\ \vec{k}\ $	velikost normály k puklině
$u_{1x}, u_{1y}, u_{2x}, u_{2y}, k_x, k_y$	složky výše zmíněných vektorů ve směru osy x a osy y

Pokud máme spočtenou změnu rozevření pukliny, můžeme lehce vyjádřit změněnou šířku pukliny, jako součet původní šířky pukliny a spočítané změny rozevření, viz vztah (31). Propustnost ze vztahu (32) (viz [4]) pak dosadíme do vztahu pro hydraulickou vodivost. Dále můžeme změněnou šířku dosadit do vztahu (33) pro hydraulickou vodivost a podle (34) spočítat její hodnoty. Hodnoty tohoto materiálového koeficientu v puklině v zatížené hornině závisí jak na vlastnostech materiálu, kterým tekutina proudí (druhá mocnina šířky pukliny), tak na vlastnostech tekutiny (hustota, dynamická viskozita). Proudícím médiem je voda.

$$b = b_0 + \Delta b \quad (31)$$

$$k = \frac{b^2}{12} \quad (32)$$

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (33)$$

$$K = \frac{b^2 \rho g}{12\mu}, \quad (34)$$

kde

b [m]	změněná šířka pukliny po zatížení
K [m·s ⁻¹]	hydraulická vodivost
k [m ²]	propustnost
$b_0 = 0,0864$ m	původní šířka pukliny (pro nezatížený model)
$\rho = 1000$ kg·m ⁻³	hustota proudící tekutiny (vody)
$g = 9,81$ m·s ⁻²	tíhové zrychlení
$\mu = 0,001002$ kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹	dynamická viskozita proudící tekutiny

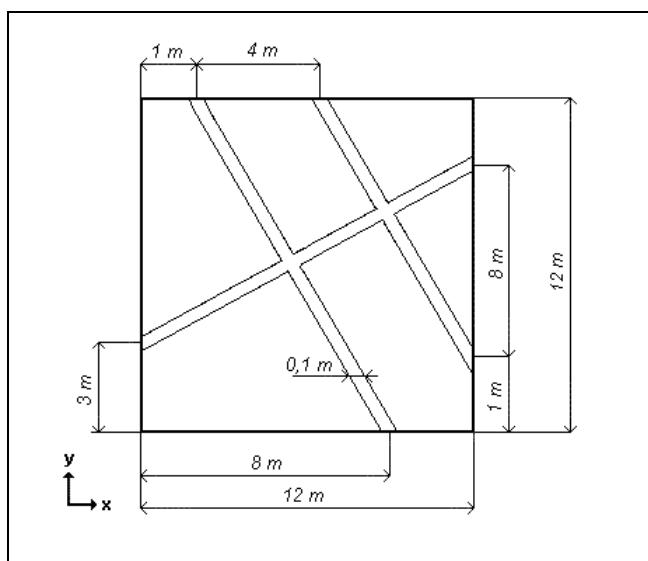
Výstupy ze skriptu jsou změna šířky, která je přiřazena k jednotlivým uzlům pukliny a hydraulická vodivost přiřazená k elementům pukliny. V rámci skriptu se vypočtená data zformátují a uloží se do výstupních souborů. Změna rozevření pukliny je převedena do formátu *.pos. Tento soubor odpovídá formátu, který lze otevřít v postprocessorovém modulu programu GMSH, a proto si můžeme výsledky graficky zobrazit v barevné škále a snadněji vyhodnotit. Hydraulické vodivosti jednotlivých elementů jsou uloženy do souboru *.mtr. Vygenerován je i soubor se sítí modelu *.msh. Oba dál použijeme jako vstupy k výpočtu proudového pole v programu Flow123D.

3 2D model horniny s několika puklinami

V této kapitole popíšeme a vyhodnotíme 2D model horniny s více puklinami, konkrétně jeho dvě varianty s puklinou aproximovanou různými materiály. Tyto dva případy pak spolu budeme porovnávat. Úloha s více puklinami navazuje na modely, kde je zkoumán blok horniny s tunelem a s puklinami, které jsou podrobněji rozebrány v semestrálním projektu [15]. Zároveň také tvoří úvod a demonstrativní úlohu k problémům, kde zkoumáme změny rozevření pukliny, které pro jednoduchost počítáme v dalších kapitolách na úloze s jednou puklinou. Charakterizujeme zde zadání a popis modelu, jeho vlastnosti a v poslední části tuto úlohu vyhodnotíme a porovnáme její dvě varianty, přitom posuzujeme hlavně kvantitativní chování rozpukané horniny.

3.1 Vlastnosti modelu

Koncept modelu odpovídá popisu vlastností modelů s puklinami, který najdeme v kapitole 2.1. Máme tedy kolmý řez 3D modelem s nekonečným rozměrem v horizontálním směru. Pukliny jsou průběžné, vedou tedy až do okrajů modelu a jsou také rozevřené. Z geometrického hlediska provádíme výpočty na modelu ve tvaru čtverce o straně 12 metrů s puklinami, které jsou aproximovány rovinnými útvary, jejichž šířka je 8,64 centimetru. Přesnější zobrazení geometrie a konkrétní rozmístění puklin nalezneme na Obr. 7. Pro snadnější popis budeme v této kapitole nazývat puklinu, která prochází z jedné strany modelu na druhou, puklinou horizontální a pukliny procházející od shora dolů puklinami vertikálními.



Obr. 7 – Model horniny s více puklinami

3.2 Materiálové vlastnosti

Pro výše popsaný model použijeme materiály uvedené v Tab. 2. Horninový materiál je granit o Youngově modulu pružnosti 45000 MPa. Puklina je v první variantě příkladu aproximována materiálem „Puklina 1“ s 10×menším Youngovým modulem pružnosti než je modul pružnosti granitu (4500 MPa) a u druhé varianty modelu je použit materiál „Puklina 2“ s modulem pružnosti 100×menším (450 MPa). Poissonova konstanta (0,23) a hustota ($2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je pro všechny materiály stejná.

3.3 Okrajové podmínky

V této úloze jsou použity okrajové podmínky se zafixováním celých stran modelu a navíc na model působí tíhové pole.

Zafixovány jsou boční strany modelu ve směru osy x a navíc je upevněn jeden bod uvnitř horniny ve směrech obou souřadných os. Na bočních stranách modelu je předepsán nulový tlak. V tomto ukázkovém příkladu je střed modelu umístěn 500 metrů pod zemským povrchem, působí na něj tíhová síla. Podle toho je model zatížen, a to napětím odpovídající tíze horniny nad modelem na plochu modelu (označeno p). Z dolní strany je předepsána reakce, která je ve vzorci označena p' :

$$F = mg = \rho Vg = \rho Shg \quad (35)$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\rho Shg}{S} = \rho hg \quad (36)$$

$$p = 2700 \cdot 494 \cdot 9,81 = 13084578 \text{ Pa}$$

$$F' = mg = \rho Vg = \rho Sg \cdot (h + d) \quad (37)$$

$$p' = \frac{F'}{S} = \frac{\rho Sg \cdot (h + d)}{S} = \rho g \cdot (h + d) \quad (38)$$

$$p' = 2700 \cdot 9,81 \cdot (494 + 12) = 13402422 \text{ Pa}, \quad (39)$$

kde

$h = 494 \text{ m}$	výška nadloží
$\rho = 2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota horniny
$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	gravitační zrychlení
$V [\text{m}^3]$	objem nadloží
$S [\text{m}^2]$	plocha podstavy modelu
$d [\text{m}]$	výška modelu
F resp. p	zatížení shora
F' resp. p'	zatížení zdola

3.4 Výsledky a zhodnocení

Jak už bylo řečeno, vyhodnocení příkladů není snadná záležitost. Charakterizujeme tedy pouze několik vybraných veličin. Nejprve popíšeme výsledky pro model s materiálem pukliny „Puklina 1“ (celkové posunutí, pole napětí a pole deformace). V další části budeme konfrontovat tento model s modelem, jehož puklina je aproximována „měkčím“ materiálem „Puklina 2“. Pro toto srovnání použijeme veličiny: celkové posunutí, intenzita deformace a smykové napětí.

3.5 Model s puklinou o 10×menším E

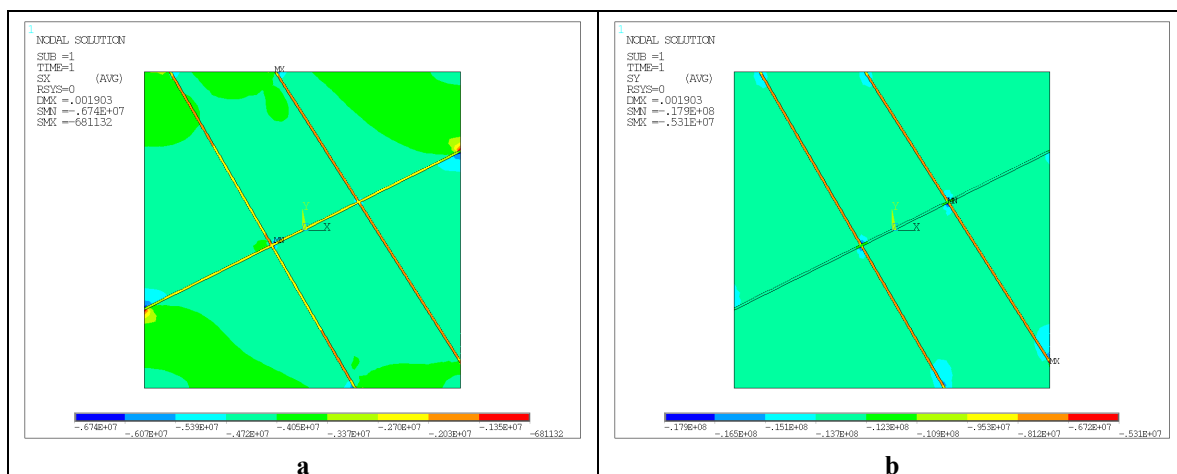
Pro model s materiálem pukliny „Puklina 1“ je díky zadanému zatížení dominantní y složka vektoru posunutí. Na Obr. 10a je uvedeno pole posunutí pro tento model. Je vidět, že pole celkového posunutí je rozděleno vlivem puklin, spojitá aproximace naznačuje nespojitost, která reálně vzniká vlivem pukliny.

3.5.1 Pole napětí

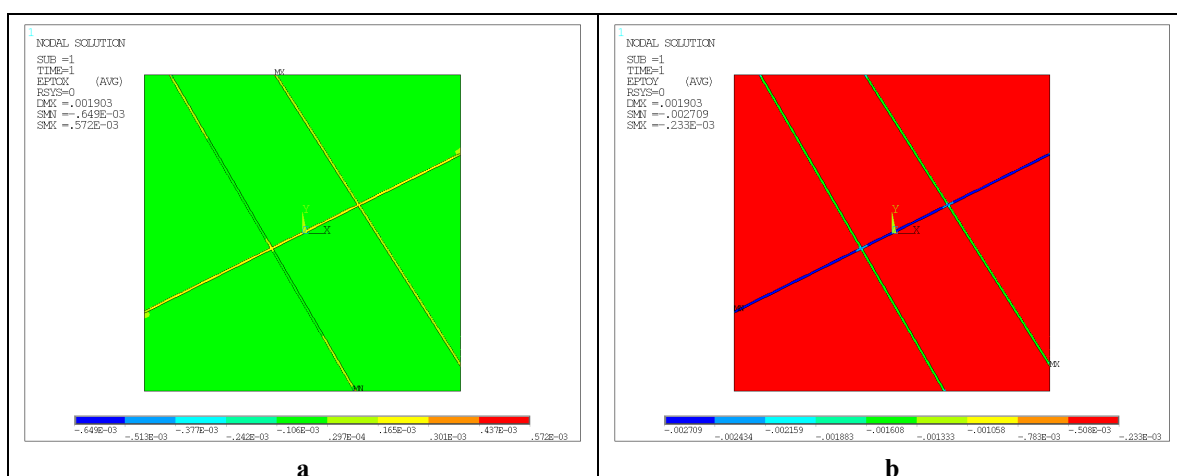
Obr. 8 zobrazuje xx a yy složky tenzoru napětí. Všechny jejich hodnoty mají záporné znaménko, jedná se tedy o tlak. Složka tenzoru napětí xx se pohybuje v puklině od -2,5 MPa do -1,7 MPa, přitom v horizontální puklině dosahuje v absolutní hodnotě hodnot vyšších než v puklinách vertikálních, v pravé vertikální puklině má hodnoty v absolutní hodnotě nejnižší. Ve zbytku modelu, tedy v horninových blocích, je napětí přibližně rovno -4 MPa. Hodnoty yy složek napětí jsou vyšší, ve vertikálních puklinách je jejich hodnota okolo -7 MPa až -8 MPa a v horizontální puklině a v horninových blocích odpovídají zadanému zatížení (hodnoty přes 13 MPa).

3.5.2 Pole deformace

Složky tenzoru deformace xx a yy zobrazuje Obr. 9, jedná se o relativní změnu délky elementů. Můžeme vidět, že puklina se ve směru osy x roztahuje, ale všechny hodnoty jsou v řádu setin procent. Deformace ve směru osy y dosahuje v puklinách i v horninových blocích vyšších hodnot. Všechny tyto hodnoty jsou naopak záporné, velikost se tedy ve směru osy y zmenšuje. K nejvýraznějšímu zúžení dochází u puklin, a to v řádu desetin procent (nejvíce u horizontální pukliny, téměř o 0,3 %). Celkově tedy můžeme říci, že se model více deformuje ve směru osy y , a to díky dominantní složce yy tenzoru deformace, k největším deformacím dochází v puklině.



Obr. 8 – Puklina s 10×menším E, složka tenzoru napětí(a) xx, (b) yy



Obr. 9 – Puklina s 10×menším E, složka tenzoru deformace: (a) xx, (b) yy

Tab. 3 – Porovnání deformací pro modely s různým E pukliny

max. hodnoty v puklině (v absolutní hodnotě)	10×menší E	100×menší E
$u_{celk.} [mm]$	1,90	5,98
$\epsilon_{xx} [\%]$	0,030	0,226
$\epsilon_{yy} [\%]$	0,271	2,750
$\epsilon_{xy} [\%]$	0,197	2,143

3.6 Porovnání modelů s různým modulem pružnosti pukliny

V této části budeme porovnávat dva shodné modely, které se liší materiálem pukliny. Varianty modelu mají materiály pukliny určeny vlastnostmi materiálů „Puklina 1“ a „Puklina 2“ (viz Tab. 2). Pro srovnání jsme vybrali veličiny: celkové posunutí, intenzitu deformace a smykové napětí, které jsou samostatně popsány v podkapitolách. V Tab. 3 navíc můžeme nalézt přehlednější shrnutí v podobě porovnání obou variant modelu z hlediska celkového posunutí a jednotlivých složek tenzoru deformace. Všechny uvedené veličiny jsou v tabulce zapsány v absolutní hodnotě a bereme maximální hodnoty těchto veličin dosažených v puklině. Pokud hodnoty v tabulce porovnáme, můžeme říci, že hodnoty složek tenzoru deformace jsou pro model s puklinou s nižším modulem pružnosti přibližně desetkrát vyšší než pro model s puklinou vyšším modulem pružnosti.

3.6.1 Celkové posunutí

Celkové posunutí, které zobrazuje Obr. 10 pro obě varianty modelu, je dáno součtem jednotlivých složek vektoru posunutí. Pro oba modely dosahuje vyšších hodnot posunutí ve směru osy y , a to díky zadanému zatížení. Hodnota maximálního posunutí je pro model s puklinou s materiálem „Puklina 1“ rovno 1,90 mm, pro model s puklinou s materiálem „Puklina 2“ celkové maximální posunutí činí 5,98 mm. Pro oba obrázky platí, že nejvyšších hodnot celkového posunutí je dosaženo pro blok horniny, který leží vlevo dole. Maximální posunutí však není pro vyhodnocení tolik důležité, protože závisí na zvoleném upevnění modelu.

Zajímavější je rozložení hodnot posunutí v modelu. Hodnoty posunutí v rámci pukliny přechází víceméně plynule od jednoho kraje horninového bloku ke druhému. Pro model s materiálem pukliny „Puklina 2“ je tento efekt méně zřetelný a dochází k větším nespojitostem.

3.6.2 Intenzita deformace

Intenzita deformace je skalární charakteristika pro tenzor deformace, která umožňuje, abychom mohli tuto veličinu zobrazit v jednom obrázku. V Ansysu nalezneme intenzitu deformace pod názvem „Total mechanical strain intensity“. Původně jsme chtěli použít stejnou barevnou škálu pro oba obrázky, ale jelikož jsou hodnoty intenzity deformace v puklině s nižším E desetkrát vyšší ztrácí stejná škála svůj smysl.

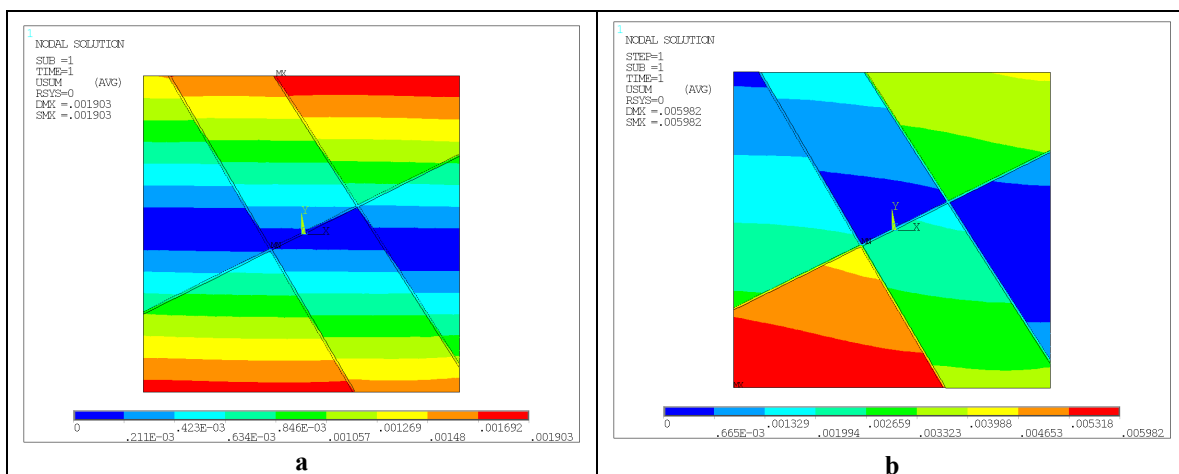
Pro obě varianty modulu pružnosti je intenzita deformace zobrazena na Obr. 11. Je patrné, že se horninový blok pro oba případy deformuje oproti puklině minimálně, intenzita deformace se pohybuje v řádu setin procenta. Deformace pukliny je u modelu s menším modulem pružnosti vyšší. A pokud porovnáme intenzitu deformace v jednotlivých puklinách, tak se více deformuje puklina horizontální. Tato vlastnost platí pro obě varianty modelu, ale díky menším hodnotám škály je lépe patrná z Obr. 11a. Hodnoty intenzity deformace se pro model s vyšším E pukliny pohybují okolo 0,25 % a pro model s nižším E jsou přibližně desetkrát vyšší (asi 2,4 %).

3.6.3 Smykové napětí

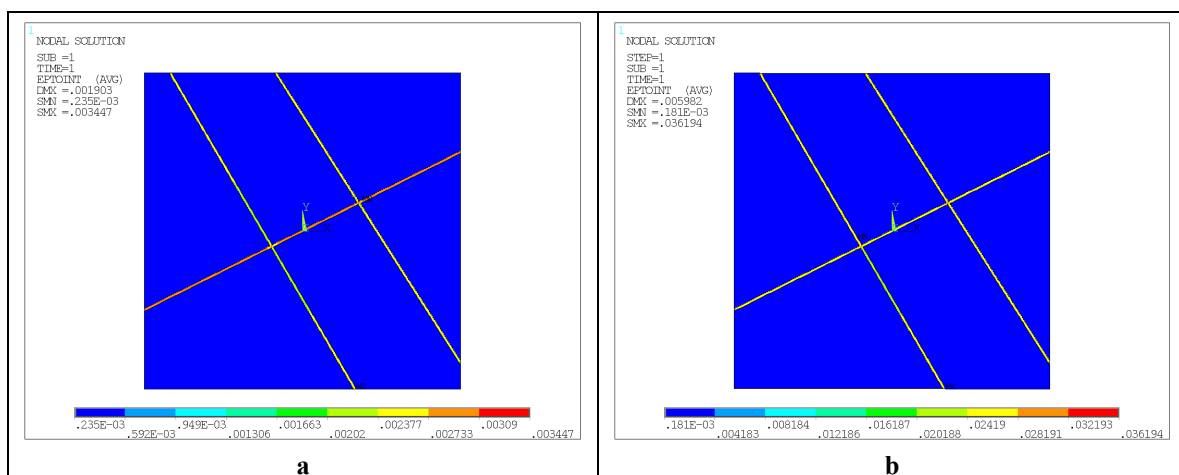
Další veličina, kterou budeme v této úloze srovnávat je smykové napětí. Na Obr. 12 jsou opět uvedeny oba modely s modifikovaným modulem pružnosti pukliny. Tentokrát je výhodnější oba obrázky zobrazit ve stejné barevné škále, takže je budeme moci snadněji porovnat. Hodnoty smykového napětí na obrázku Obr. 12b, které překračují minimum škály, jsou zobrazeny šedou barvou, naopak hodnoty překračující maximum jsou růžové.

Důvodem vzniku smykového napětí u modelů s puklinami je právě přítomnost puklin. U obou obrázků se hodnoty této složky tenzoru napětí v hornině pohybují okolo nuly, ke smykové napětí tedy dochází pouze v puklinách.

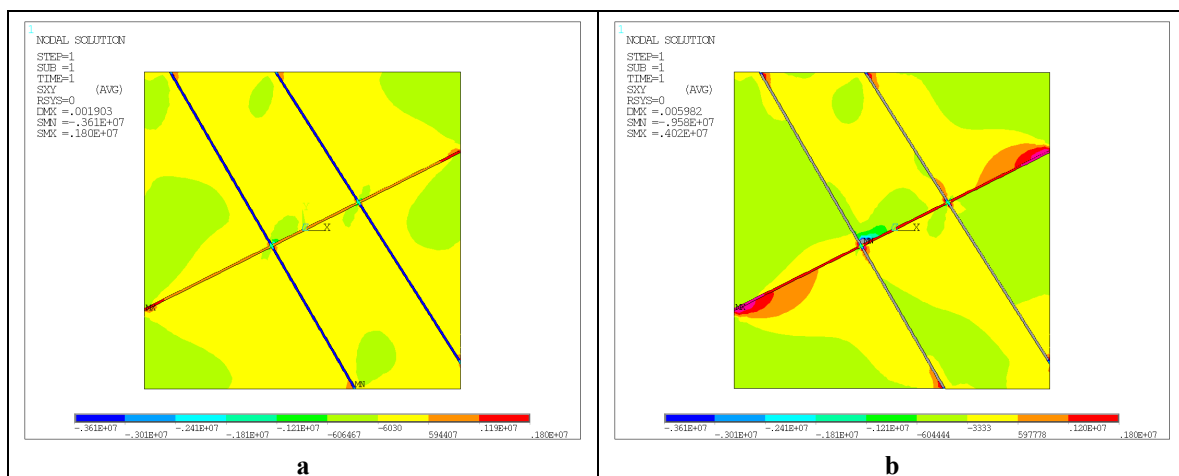
U obou obrázků dochází k nespojitostem na okrajích puklin a tam, kde se pukliny kříží, což je však pouze efekt modelu, který nepopisuje realitu. Pokud budeme zkoumat napětí uvnitř puklin, zjistíme, že pro oba modely je ve vertikálních puklinách napětí záporné. Pro model s materiálem pukliny „Puklina 1“ dosahuje maximálně hodnoty -3,61 MPa. U modelu s nižším E pukliny napětí dokonce přesáhlo barevnou škálu a je zobrazeno šedě, což v tomto případě odpovídá hodnotám menším než -6,6 MPa. Smykové napětí je v horizontální puklině pro oba modely kladné (maximálně však dosahuje hodnoty 1,80 MPa). Maximální a minimální hodnota, která je uvedena přímo na Obr. 12b vlevo nahoře, náleží výše zmiňovaným nespojitostem.



Obr. 10 – Celkové posunutí: (a) 10×menší E, (b) 100×menší E



Obr. 11 – Intenzita deformace: (a) 10×menší E, (b) 100×menší E



Obr. 12 – Smykové napětí: (a) 10×menší E, (b) 100×menší E

4 2D model horniny s jednou puklinou

Tato kapitola se zabývá výpočtem sdružených úloh na modelu horniny s jednou puklinou. Výpočty provádíme podle metodiky v kapitole 2, nejprve počítáme úlohu napjatosti v Ansysu, poté transformaci pole posunutí do změny rozevření pukliny a v poslední fázi úlohu proudění ve Flow123D. Ve stejném pořadí budeme dále popisovat postup i vyhodnocení jednotlivých částí výpočtů. Na modelu horniny s jednou puklinou zkoumáme jednak změny v bloku horniny, které vzniknou vlivem různého normálového napětí, ale hlavně změny rozevření pukliny pro různá zatížení. V závislosti na změně šířky pukliny vyhodnocujeme i změnu hydraulické vodivosti horniny. Pro tyto potřeby nám model s jednou puklinou postačuje, více puklin, navíc orientovaných různým směrem, by nám vyhodnocování komplikovalo.

4.1 Úloha napjatosti

Výpočty úlohy napjatosti jsou simulovány opět softwarovým nástrojem Ansys a protože úloha, ve které se zabýváme modelem horniny s jednou puklinou je zjednodušením modelu s více puklinami (viz kapitola 3), postupujeme v simulaci analogicky. Rozdíl se projeví pouze u úlohy s nelineárním materiálem pukliny, kde musíme nastavit další parametry pro nelineární analýzu.

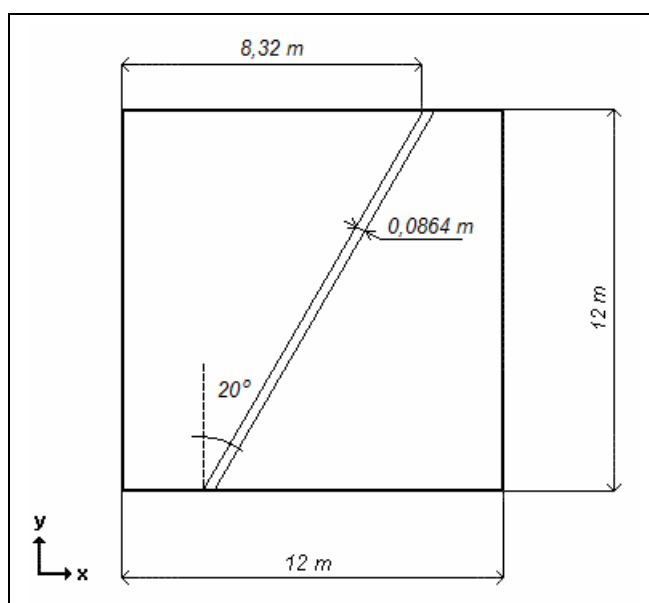
4.1.1 Popis modelů a materiálové vlastnosti pro úlohu napjatosti

Tato úloha svou koncepcí odpovídá modelu z kapitoly 3. Jedná se tedy o 2D model bloku horniny. Geometrii úlohy tvoří čtverec o straně 12 metrů, puklina prochází šikmo zdola nahoru celým modelem pod úhlem 20° . Šířka pukliny nezatíženého modelu zůstává stejná, měří 8,64 cm. Celá geometrie je přesněji zobrazena na Obr. 13.

Materiál horniny zůstal stejný jako v modelech v předcházející kapitole, aproximován je granitem o fyzikálních vlastnostech uvedených v Tab. 2. Pro puklinu jsme zvolili čtyři materiálové modely s lineárním a nelineárním materiálem. Nejprve jsme simulovali případy s lineárním materiálem stejným jako v předchozí kapitole. Pro připomenutí se jedná o materiály „Puklina 1“ a „Puklina 2“, kde je modul pružnosti pukliny desetkrát nižší ($E_1 = 450 \text{ MPa}$), resp. stokrát nižší ($E_2 = 45 \text{ MPa}$) než modul pružnosti horniny, (viz Tab. 2). V dalším, nově použitém lineárním materiálu je modul pružnosti pukliny $3000\times$ menší než modul pružnosti horniny, jeho hodnota činí 15 MPa a vznikl jako lineární analogie k dále uvedenému nelineárnímu materiálu.

Nelineární materiál je použit podle [4], kde je uveden graf závislosti rozevření pukliny na normálovém napětí, který jsme přeformulovali na závislost deformace na normálovém napětí. Tak ho můžeme použít pro zadání nelineárního modulu pružnosti v Ansysu. Charakteristika nelineárního materiálu spolu s lineárním s $E = 15 \text{ MPa}$ je zobrazeny v grafu na Obr. 14 (směrnice přímek vyjadřují moduly pružnosti pro příslušné části přímek), v Tab. 4 jsou uvedeny jednotlivé dvojice hodnot deformace – napětí určující nelineární materiál. Lineární materiál má pro celý rozsah deformací stejnou tuhost, nelineární model respektuje fyzikální skutečnost, že pro menší normálová napětí se materiál pukliny deformuje rychleji a pro rostoucí normálová napětí je deformace pozvolnější. Jinak řečeno: pro menší normálová napětí dochází k většímu rozevření pukliny, pro vyšší napětí se puklina rozevírá pomaleji.

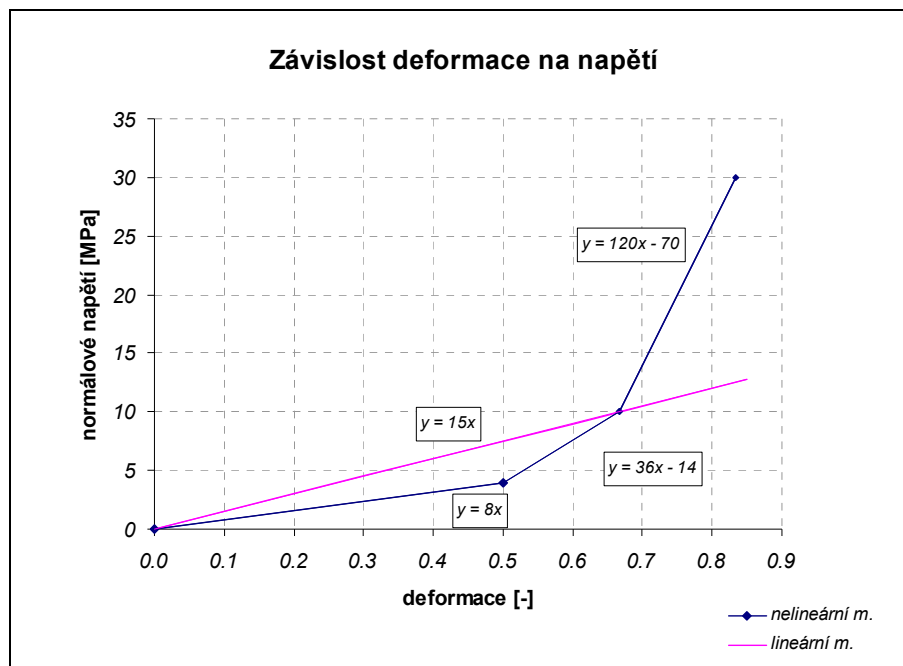
Ostatní potřebné materiálové vlastnosti zůstávají pro horninu i pro všechny varianty materiálu pukliny stejné, Poissonova konstanta je rovna hodnotě 0,23 a hustota hodnotě $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.



Obr. 13 – Model horniny s jednou puklinou

Tab. 4 – Nelineární modul pružnosti

deformace [-]	normálové napětí [MPa]	modul pružnosti [MPa]
0	0	
1/2	4	8
2/3	7	36
5/6	30	120



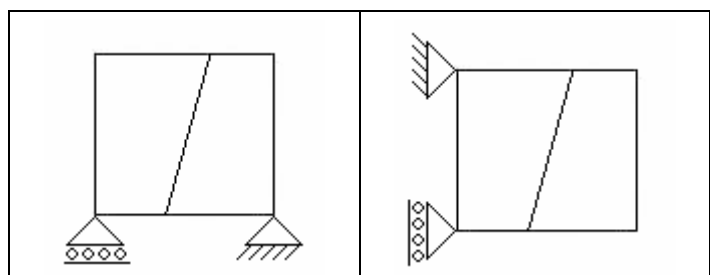
Obr. 14 – Lineární a nelineární Youngův modul pružnosti

4.1.2 Okrajové podmínky pro úlohu napjatosti

Pro model s jednou puklinou jsou použity odlišné okrajové podmínky než v předchozí úloze. Zvolili jsme dvě varianty, které se liší způsobem upevnění. Ve výsledku to znamená, že jsou buď upevněny oba bloky horniny modelu, nebo je upevněn pouze levý blok a pravý „drží“ pouze přes puklinu.

V prvním případě je předepsáno nulové posunutí ve směru obou souřadných os v pravém dolním rohu modelu a nulové posunutí ve směru osy y v levém dolním rohu modelu. Ve variantě druhé je upevnění analogické, pouze je umístěné z boku modelu. Fixován je tedy levý horní roh ve směru osy x a levý dolní roh ve směru obou souřadných os. Oba typy upevnění ilustruje Obr. 15.

V této úloze na model nepůsobí tíhová síla, zatížení je ale voleno tak, aby jeho velikost přibližně odpovídala umístění 500 metrů pod povrchem Země jako v úloze s více puklinami. Model je tedy zatížen normálovým napětím 13 MPa, buď na vrchní a spodní straně, nebo z bočních stran, případně ze všech čtyř stran. Další kombinace zatížení jsou voleny tak, že normálová napětí odpovídají násobkům 13 MPa a jejich umístění je různě zkombinováno. Konkrétní počítané varianty modelu s jednou puklinou nalezneme na Obr. 16.



Obr. 15 – Upevnění zdola a z boku

ZATÍŽENÍ 1	ZATÍŽENÍ 2	ZATÍŽENÍ 3
ZATÍŽENÍ 4	ZATÍŽENÍ 4a	ZATÍŽENÍ 5
ZATÍŽENÍ 6	ZATÍŽENÍ O2	ZATÍŽENÍ O2a
ZATÍŽENÍ O3	ZATÍŽENÍ O3a	

Obr. 16 – Počítané varianty zatížení

4.1.3 Vyhodnocení úlohy napjatosti

Pro počáteční zkoumání vlivů napětí na blok horniny jsme použili materiálové modely „Puklina 1“ a „Puklina 2“. V další části se setkáme ještě s lineárním modelem charakterizovaným vyšším poměrem modulů pružnosti horniny a pukliny, který lze lépe porovnat s modelem nelineárním, jenž lépe odpovídá skutečnosti. Zde vyhodnocujeme jednotlivé složky tenzoru napětí a deformace, případně složky vektoru posunutí.

Obecně platí, že pole napětí a deformace pro modely s upevněním dole přibližně odpovídají hodnotám pro modely s upevněním na boku (tato vlastnost platí i pro nelineární model pukliny). Pole napětí resp. deformace je v modelech rozděleno podle materiálu. Ve většině případů dosahuje v hornině konstantních hodnot a jiných, ale také konstantních v puklině. Určité nespojitosti v hodnotách můžeme sledovat při okrajích pukliny, případně v místech upevnění, ale tato vlastnost je pro chování pukliny i celého bloku horniny nepodstatná.

4.1.3.1 Lineární materiál pukliny ($E = 4500 \text{ MPa}$, $E = 450 \text{ MPa}$)

Výpočty jsme aplikovali na sadu úloh s různou kombinací normálového napětí o velikosti 0 MPa, -13 MPa a -26 MPa, která je popsána na Obr. 16. Pro tyto materiály pukliny jsme nepočítali modely označené: „Zatížení 4a“, „Zatížení O2a“ a „Zatížení O3a“. Tyto úlohy byly přidány až pro další modely materiálů pukliny, ale pro úplnost jsou zobrazeny všechny varianty najednou v jednom obrázku.

Pro lineární materiály s vyšším Youngovým modulem pružnosti („Puklina 1“ a „Puklina 2“) dochází k nižší deformaci pukliny. Rozebereme úlohy zatížené normálovým napětím pouze z boku („Zatížení 4“ a „Zatížení O3“). Hodnoty jednotlivých veličin pro horninu i pro puklinu jsou uvedeny v Tab. 5, pro materiál „Puklina 1“ i „Puklina 2“. V této tabulce jsou vypsány hodnoty pro „Zatížení 4“, pro „Zatížení O3“ by byla situace obdobná.

Protože je materiál horniny pro obě varianty shodný, vychází pro oba materiály hodnoty všech veličin v hornině stejné. Hodnota velikosti xx složky tenzoru napětí odpovídá předepsanému tlaku 26 MPa. Smykové napětí a yy složka dosahují řádově o mnoho nižších hodnot okolo nuly. Odchyłky velikostí napětí pro puklinu jsou v řádu desetin MPa. Pro složky tenzoru deformace platí, že jsou v puklině s materiálem „Puklina 1“ přibližně desetkrát vyšší než v puklině s materiálem „Puklina 2“, což odpovídá poměrům jejich modulů pružnosti. Maximální hodnoty

dosahuje složka xx tenzoru deformace a je v hornině rovna $-5,44 \cdot 10^{-4}$. Podle Hookova zákona pro 1D by deformace měla činit $-5,78 \cdot 10^{-4}$, ale v Ansysu jsou modely řešeny v režimu rovinné deformace. Po zahrnutí tohoto jevu do vzorce nám výpočet potvrdí výsledek z Ansysu. Jediná kladná je složka yy tenzoru deformace, jak v hornině, tak v puklině. Analogicky se bude chovat model označený „Zatížení 5“, pouze s tím rozdílem, že v tomto případě je blok horniny zatížen pouze shora a zdola tlakem 26 MPa. Hodnoty jednotlivých veličin jsou uvedeny v Tab. 6, porovnáním obou tabulek zjistíme, že principiální vlastnosti jsou shodné. Pro toto zatížení je puklina namáhána yy napětím okolo 8,5 MPa (napětí ve směru zatížení) pro oba materiály, oproti tomu v případě zatížení z boku je v puklině xx napětí téměř třikrát vyšší (přes 26 MPa). Tím pádem nezávisí jen na velikosti normálového napětí, ale i na směru, ve kterém působí. Pokud napětí působí ve směru pukliny, puklina se pro stejnou hodnotu normálového napětí deformuje téměř třikrát méně.

Protože se jedná o lineární modely, platí zde princip superpozice. Proto můžeme říct, že např. platí: Zatížení 3 = Zatížení 1 + Zatížení 4 a vlastnosti varianty Zatížení 3 můžeme odvozovat ze součtu výše zmíněných modelů.

Tab. 5 – Složky tenzoru deformace a napětí pro Zatížení 4

	Puklina 1		Puklina 2	
	hornina	puklina	hornina	puklina
$\epsilon_{xx}[-]$	$-5,44 \cdot 10^{-4}$	$-5,37 \cdot 10^{-3}$	$-5,43 \cdot 10^{-4}$	$-5,36 \cdot 10^{-2}$
$\epsilon_{yy}[-]$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$9,65 \cdot 10^{-3}$
$\epsilon_{xy}[-]$	+/- hodnoty v řádu 10^{-4}	$-6,3 \cdot 10^{-4}$	+/- hodnoty v řádu 10^{-4}	$-6,87 \cdot 10^{-3}$
$\tau_{xx}[\text{MPa}]$	-26	-26,4	-26	-26,5
$\tau_{yy}[\text{MPa}]$	přibližně 0	-3,03	přibližně 0	-3,34
$\tau_{xy}[\text{MPa}]$	přibližně 0	-1,15	přibližně 0	-1,26

Tab. 6 – Složky tenzoru deformace a napětí pro Zatížení 5

	Puklina 1		Puklina 2	
	hornina	puklina	hornina	puklina
$\epsilon_{xx}[-]$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-3}$
$\epsilon_{yy}[-]$	$-5,5 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$-5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$
$\epsilon_{xy}[-]$	+/- hodnoty v řádu 10^{-4}	$2 \cdot 10^{-3}$	+/- hodnoty v řádu 10^{-4}	$-3,9 \cdot 10^{-2}$
$\tau_{xx}[\text{MPa}]$	přibližně 0	-2,4	přibližně 0	-2,6
$\tau_{yy}[\text{MPa}]$	-26	-8,5	-26	-8,47
$\tau_{xy}[\text{MPa}]$	přibližně 0	-6,3	přibližně 0	-6,7

4.1.3.2 Lineární materiál pukliny ($E = 15 \text{ MPa}$)

Dále jsme simulovali modely s lineárním materiálem pukliny o Youngově modulu pružnosti 15 MPa , což je $3000\times$ méně než modul pružnosti horniny. Tuto sadu modelů lze lépe porovnávat s modely s nelineárním materiálem pukliny, protože hodnoty modulů pružnosti mají pro oba materiály podobné hodnoty. Oproti předchozí kapitole jsme navíc simulovali další případy zatížení („Zatížení 4a“, „Zatížení O2a“ a „Zatížení O3a“), tedy všechna uvedená na Obr. 16.

Protože model materiálu je opět lineární, platí podobné vlastnosti jako v minulé kapitole, např. platí princip superpozice. Kvůli stejnému materiálu horniny dosahují hodnoty deformací a napětí v hornině stejných hodnot pro všechny počítané modely v porovnání s variantami s materiálem pukliny „Puklina 1“ a „Puklina 2“. Pro tento měkkší materiál však dochází v puklině k větším deformačním účinkům než pro materiálové modely v minulých dvou podkapitolách. Pro některá zatížení se puklina dokonce úplně uzavřela, více bude popsáno v části týkající se změny šířky pukliny.

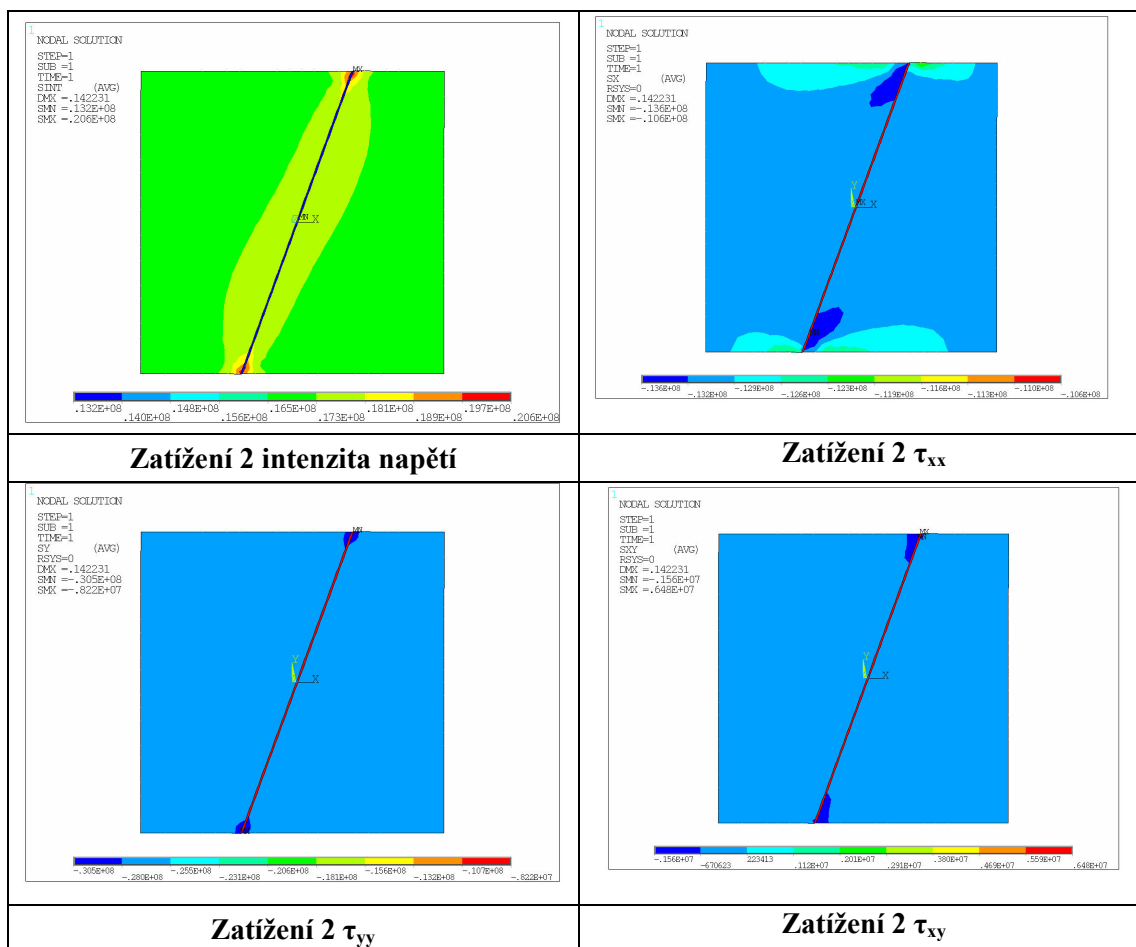
Pro materiály „Puklina 1“ a „Puklina 2“ jsme popisovali ty případy, které byly zatíženy pouze ze dvou stran. Abychom postihli všechny varianty zatížení počítaných modelů, budeme v této části charakterizovat modely zatížené ze všech čtyř stran: „Zatížení 2“, model, na němž je předepsáno 13 MPa ze stran a 26 MPa shora a zdola a „Zatížení 3“, které je zatíženo opačně.

Intenzita napětí a všechny složky tenzoru napětí pro „Zatížení 2“ jsou zobrazeny na Obr. 17, porovnání deformovaného modelu a složek tenzoru deformace pro obě zatížení na Obr. 18. Všechny složky obou tenzorů pro obě uvažovaná zatížení jsou pro lepší přehlednost vypsány v Tab. 7.

Vlevo nahoře na Obr. 17 je znázorněna intenzita napětí, která dosahuje nejvyšších hodnot v okolí pukliny, v hornině více vzdálené od pukliny je nižší a v puklině nejnižší. Pro „Zatížení 3“ je situace opačná, nejintenzivněji napětí působí v puklině, v hornině dosahuje intenzita napětí hodnot nejnižších, což můžeme vysvětlit vyšším předepsaným tlakem z bočních stran. Dále můžeme vidět jednotlivé složky tenzoru napětí pro „Zatížení 2“, na okrajích puklin se tvoří výše zmíněné nespojitosti, které dosahují největšího rozsahu u xx složky tenzoru napětí. Velikost napětí xx a yy v hornině odpovídá předepsaným hodnotám, smykové napětí v hornině je nulové. Složky xx napětí jsou v puklině v řádu desítek MPa , yy složka

v jednotkách MPa a xy složka v řádu jednotek MPa. U všech případů kromě smykových složek se jedná o záporná čísla.

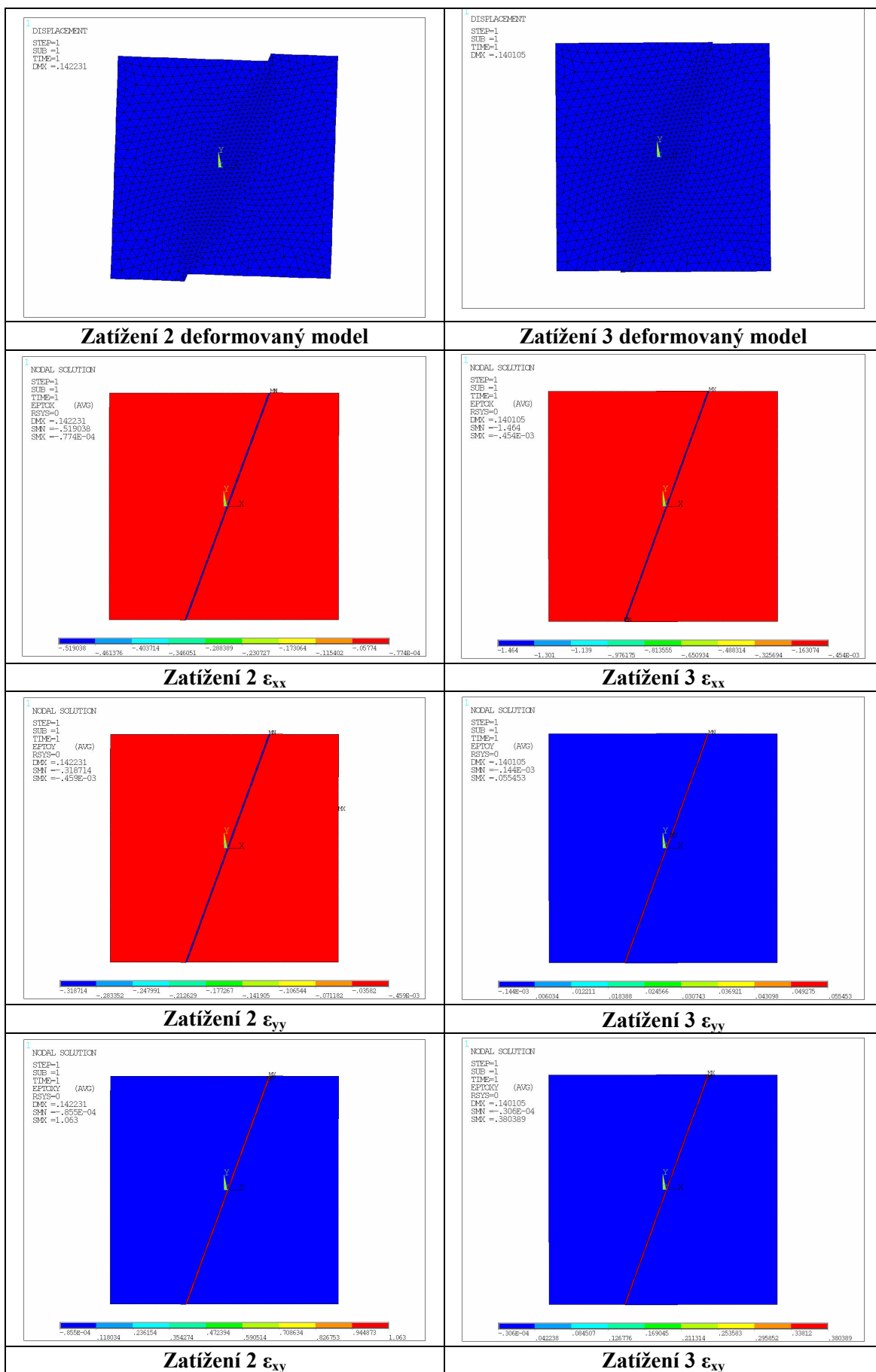
Na Obr. 18 na prvních dvou obrázcích vidíme deformaci modelů, bloky horniny jsou zobrazeny s pětkrát větší deformací kvůli lepší názornosti. U „Zatížení 2“, na které je aplikováno vyšší napětí seshora a zdola, je vidět, že se levý blok horniny otáčí kolem levého dolního rohu, oproti tomu pro „Zatížení 3“ se bloky posouvají k sobě. Složky tenzoru deformace dosahují záporných hodnot, pouze smykové deformace v puklině a yy složka v puklině pro „Zatížení 3“ mají kladné znaménko.



Obr. 17 – Složky tenzoru napětí a deformace pro „Zatížení 2“ (lin. materiál $E = 15 \text{ MPa}$)

Tab. 7 – Složky tenzoru deformace a napětí pro lineární materiál $E = 15 \text{ MPa}$

	Zatížení 2		Zatížení 3	
	hornina	puklina	hornina	puklina
$\epsilon_{xx}[-]$	hodnoty v řádu -10^{-2} až -10^{-4}	$-5,19 \cdot 10^{-1}$	hodnoty v řádu -10^{-1} až -10^{-3}	-1,464
$\epsilon_{yy}[-]$	hodnoty v řádu -10^{-1} až -10^{-3}	$-3,19 \cdot 10^{-1}$	přibližně 0	$5,55 \cdot 10^{-2}$
$\epsilon_{xy}[-]$	přibližně 0	1,063	přibližně 0	$3,80 \cdot 10^{-1}$
$\tau_{xx}[\text{MPa}]$	-13	-10,6	-26	-25,2
$\tau_{yy}[\text{MPa}]$	-26	-8,2	-13	-6,6
$\tau_{xy}[\text{MPa}]$	přibližně 0	6,5	přibližně 0	2,3



Obr. 18 – Složky tenzoru deformace pro „Zatížení 2“ a „Zatížení 3“ (lin. materiál E = 15 MPa)

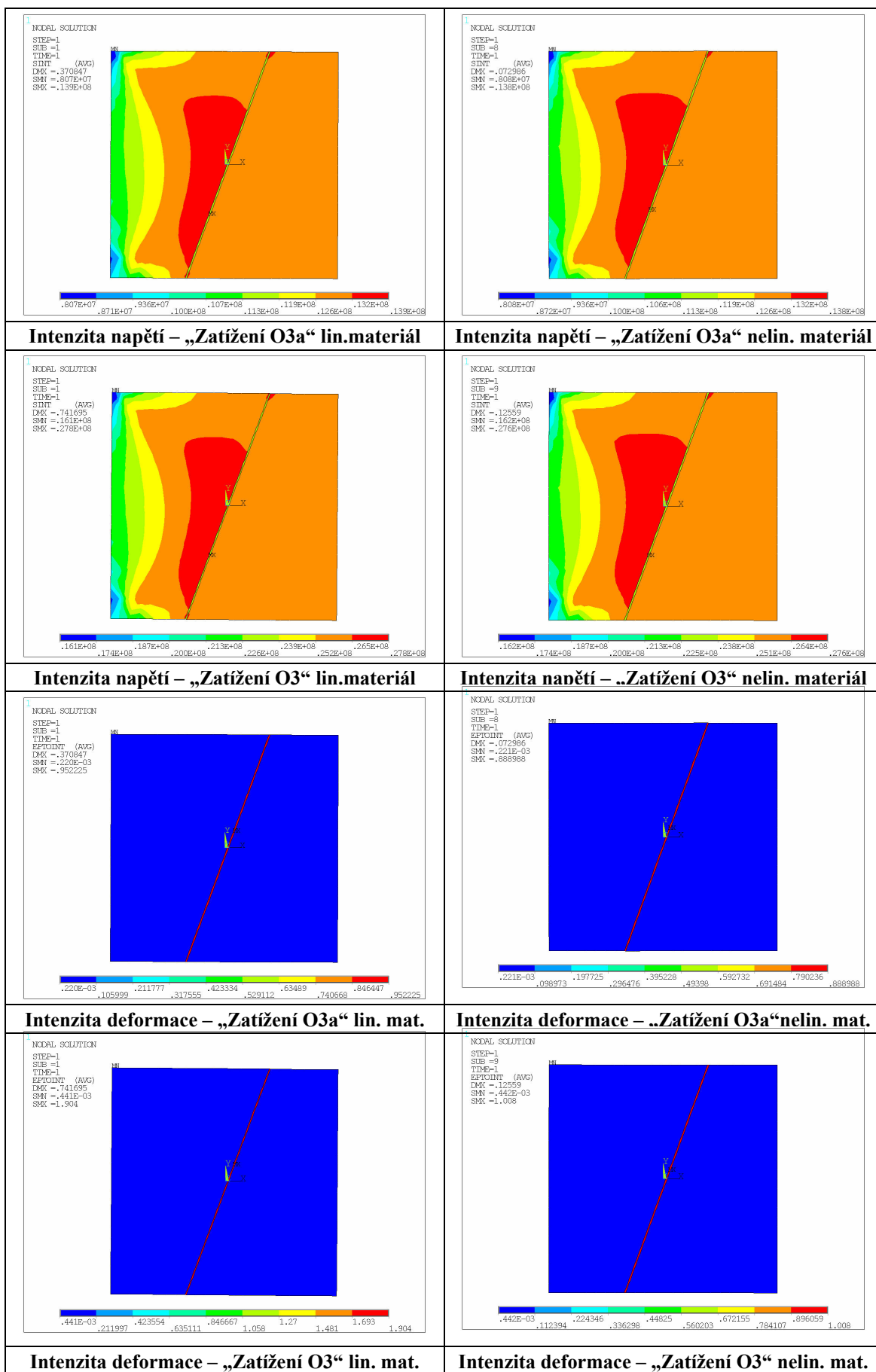
4.1.3.3 Nelineární materiál pukliny

Poslední typem počítaných úloh, jsou modely s nelineárním materiálem pukliny. Tento materiál více odpovídá reálnému chování bloku horniny s puklinami, pro nižší normálová napětí se deformuje více (je „měkkčí“), naopak při vyšších hodnotách normálového zatížení dochází k vyšší deformaci (je pevnější). V této části textu budeme porovnávat vybrané modely s různým materiálem pukliny: lineární materiál s $E = 15 \text{ MPa}$ a zmíněný nelineární materiál popsany grafem na Obr. 14. Tentokrát k porovnání použijeme modely upevněné z boku, konkrétně „Zatížení O3“ a „Zatížení O3a“, na oba dva působí předepsaný tlak z boku: 26 MPa, resp. 13 MPa, seshora a zdola je předepsaný nulové napětí. Tímto porovnáním chceme doložit rozdíl chování pukliny s lineárním modelem oproti nelineárnímu modelu materiálu.

K porovnání využijeme veličiny intenzita deformace a intenzita napětí, které vyjadřují jakési zprůměrování tenzoru deformace (napětí) a můžeme je pro oba vybrané modely vidět na Obr. 19. Modely, na něž je aplikováno stejné zatížení, leží vedle sebe, vlevo je model s nižší hodnotou tlaku. Intenzita napětí je pro modely se stejným zatížením, ale s různým materiálem pukliny, stejná, tj. obrázky na řádku jsou shodné. Kvantitativně je nižší v puklině a nepatrně vyšších hodnot dosahuje v hornině. Z obrázků je zřejmé, že intenzita deformace je nízká pro horninu, puklina se díky „měkkému“ materiálu v obou případech deformuje mnohem více. Konkrétní hodnoty intenzity deformace v hornině si pro stejná zatížení odpovídají: pro „Zatížení O3a“ je rovna $2,2 \cdot 10^{-4}$, pro „Zatížení O3“ se rovná dvojnásobek, tedy $4,4 \cdot 10^{-4}$, důvodem je linearita modelu materiálu horniny. Situace v puklině je trochu jiná. Velikost intenzity deformace pro boční tlak 13 MPa pro lineární model je rovna 0,952, pro nelineární 0,889. Pokud tlak zvýšíme na dvojnásobek, tedy na 26 MPa, v lineárním modelu se intenzita deformace také změní na dvojnásobek (tedy na 1,904), pro nelineární model je však intenzita deformace při stejném zatížení rovna 1,008. Toto chování můžeme zdůvodnit právě nelinearitou materiálu pukliny.

Tab. 8 – Intenzita defomace pro lin. a nelin. materiál pukliny

	Zatížení O3a		Zatížení O3	
	hornina	puklina	hornina	puklina
lineární mat.	$4,4 \cdot 10^{-4}$	0,952	$4,4 \cdot 10^{-4}$	1,904
nelineární mat.	$2,2 \cdot 10^{-4}$	0,889	$2,2 \cdot 10^{-4}$	1,008



Obr. 19 – Intenzita deformace pro „Zatížení O3“ a „Zatížení O3a“ pro lin. a nelin. materiál

5 Model proudění, změna rozevření pukliny a hydraulické vodivosti pro různé poměry normálových tlaků

V této kapitole konkrétně popíšeme model proudění, jeho okrajové podmínky a další nastavení. Dále se budeme zabývat změnou šířky pukliny, shrneme výsledky vypočítané pomocí skriptu v Matlabu pro různé modely materiálu pukliny. V závěru vyhodnotíme změnu hydraulické vodivosti pro blok horniny zatížený různými poměry tlakového zatížení s nelineárním materiálem pukliny.

5.1 Model proudění

Úloha proudění je počítána pomocí softwaru Flow123D. Simulací proudění v horninovém bloku chceme demonstrovat vliv změny rozevření pukliny na hydraulickou vodivost. Horninovému bloku předepíšeme modelové okrajové podmínky a zkoumáme změnu průtoku vody horninou, přitom změněné rozevření pukliny a z něho i změněná hydraulická vodivost vychází z výpočtů úlohy napjatosti v Ansysu. Obecná metodika, podle které postupujeme v modelování pole proudění bloku horniny s jednou puklinou je uvedena v kapitole 2. Dále představíme konkrétnější popis tohoto modelu, materiálových vlastností, okrajových podmínek a dalších nastavení.

5.1.1 Popis modelu proudění, okrajové podmínky

Pro úlohu proudění jsme použili stejnou geometrii jako v úloze napjatosti, popis nalezneme na Obr. 13, výpočty provádíme na 2D modelu horniny s jednou puklinou. Geometrie je shodná, i když ve skutečnosti puklina vlivem zatížení změní šířku. Do modelu proudění tedy není tato změna zahrnuta fyzickým přetvořením geometrie, ale změnou hodnot hydraulické vodivosti jednotlivých elementů pukliny.

Kvůli souladu s realitou musíme provést určitou transformaci veličin. Důvodem je skutečnost, že jsme v úloze napjatosti uvažovali šířku pukliny v řádu centimetrů, reálně se šířka pukliny v hornině pohybuje v desítkách mikrometrů. Proto stačí všechny rozměry modelu vynásobit hodnotou 10^{-3} a hodnoty počítaných veličin budou vycházet reálněji, například velikost toku blokem horniny bude 10^{-3} krát menší než tok, který by vycházel z původních rozměrů modelu. Velikost modelu se nám tedy zmenší z 12 m na 12 mm a šířka pukliny z 8,64 cm na 86,4 μm , což vidíme rozepsané v Tab. 9:

Tab. 9 – Transformace rozměrů modelu

velikost	Ansys	Flow123D
model [m]	1,2E+01	1,20E-02
puklina [m]	8,64E-02	8,64E-05

Vstupy do Flow123D tvoří soubory, které jsme museli vygenerovat z dat z Ansysu, viz část 2.3.3, konkrétně to jsou soubory obsahující: síť (uzly, elementy), materiálové vlastnosti, popis sousedních elementů, okrajové podmínky a inicializační nastavení. Model jako v úloze napjatosti obsahuje dva materiály: materiál pukliny a materiál horniny. Podstatnou veličinou, kterou potřebujeme pro popis úlohy proudění je hydraulická vodivost. Hodnotu hydraulické vodivosti pukliny v nezatíženém stavu jsme určili podle vztahu (34), zároveň jsme uvažovali výše zmíněnou transformaci. Po vyčíslení vychází rovna asi $6,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$K = \frac{b^2 \rho g}{12 \mu} = \frac{(8,64 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 10^3 \cdot (10^{-3})^{-3} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,001002 \cdot (10^{-3})^{-1}} = 6,090424 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (40)$$

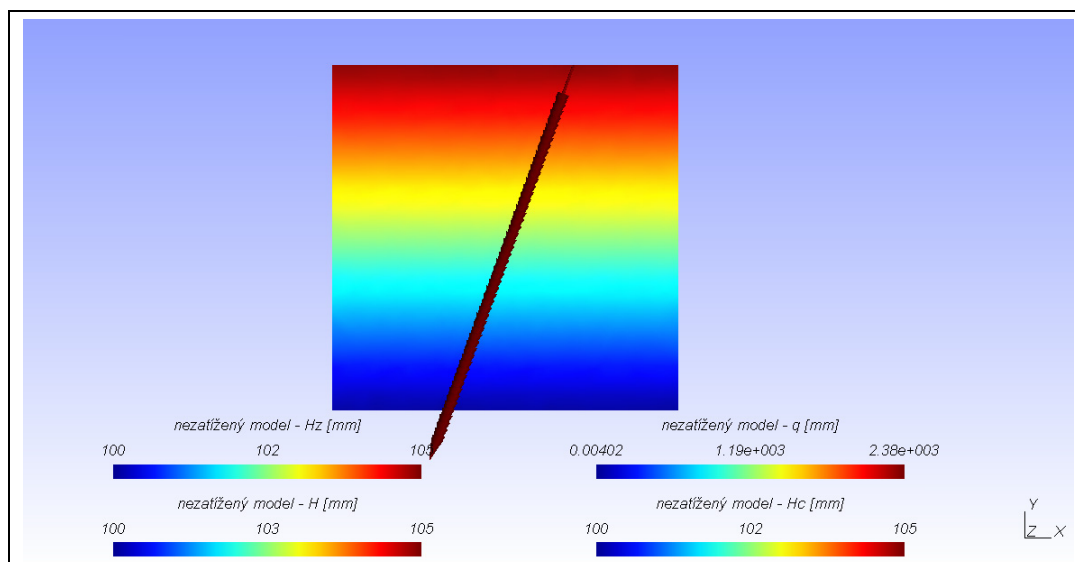
$$K = 6,090424 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (41)$$

Pro zatíženou horninu se hydraulická vodivost vypočítá analogicky dosazením změněné šířky pukliny. Hodnoty hydraulické vodivosti jsou přiřazeny k jednotlivým elementům pukliny, dostali jsme tedy tolik koeficientů, kolik je elementů v puklině plus jeden za materiál horniny. Hydraulická vodivost horniny je mnohonásobně nižší než vodivost pukliny. Její velikost jsme zvolili na hodnotu $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, aby celkovou hydraulickou vodivost horninového bloku neovlivnila a většina vody protekla puklinou. Další materiálové vlastnosti jako dvojí porozita, sorpce apod. jsme neuvažovali.

Použili jsme modelové okrajové podmínky, jen abychom vytvořili gradient hydraulické výšky mezi horní a dolní stranou modelu. Na horní straně modelu je předepsáno 105 mm a na dolní straně 100 mm. Všechny tyto údaje jsou uvedeny v souboru *.fbc. Další nastavení jako druh proudícího media, jeho hustota, tíhové zrychlení, požadované výstupy atd. jsou zapsána v inicializačním souboru Flow123D.

5.1.2 Vyhodnocení modelu proudění

Výstupem z modelu proudění je soubor *.pos, který můžeme zobrazit v posprocessorovém modulu programu GMSH. Na Obr. 20 je znázorněno proudění blokem horniny v nezatíženém stavu. V barevné škále je zobrazena hydraulická výška (hodnotě 105 mm odpovídá červená barva, hodnotě 100 mm barva modrá), rychlost proudění popisují šipky. Je vidět, že všechny prochází puklinou, tok horninou je tedy zanedbatelný. Změny hydraulické vodivosti a změny toku horninou jsou podrobněji rozepsány v další kapitole.



Obr. 20 – Model proudění – nezatížený model

5.2 Změna šířky pukliny

Změnu šířky pukliny jsme spočítali z pole posunutí jako kolmý průmět rozdílu posunutí uzlů ležících v puklině naproti sobě. K výpočtu bylo nutné vytvořit skript, který je popsán v kapitole 2.3.3. Výstupem tohoto skriptu jsou hodnoty absolutní změny šířky pukliny přiřazené k jednotlivým uzlům, přitom hodnoty změny rozevření pro uzly ležící naproti sobě jsou samozřejmě shodné. Výstup je v rámci skriptu zformátován tak, aby ho bylo možné zobrazit v programu GMSH v barevné škále a srovnat rozsahy změny šířky i v rámci jednoho modelu.

Změna šířky byla počítána pro všechny uvedené materiálové modely pukliny pro model horniny s jednou puklinou (lineární i nelineární), proto můžeme porovnávat vliv materiálu pukliny na změnu šířky. Budeme zjišťovat do jaké míry lze puklinu aproximovat lineárním materiálem a kdy je nutné použít nelineární materiál, který celkově lépe odpovídá reálnému chování rozpukané horniny. Začneme s celkovým vyhodnocením změny šířky pro jednotlivé typy materiálů pukliny. Pro posouzení výsledků jsme brali jako výchozí úlohu napjatosti, kde je původní šířka pukliny o velikosti 8,64 centimetrů.

5.2.1 Lineární materiál pukliny ($E = 4500 \text{ MPa}$, $E = 450 \text{ MPa}$)

Pro oba materiály s nižším poměrem modulů pružnosti horniny a pukliny, výše označované jako „Puklina 1“ a „Puklina 2“, platí shodné kvalitativní vlastnosti pro změnu šířky pukliny.

V Tab. 10 jsou uvedeny hodnoty změny šířky pro výše uvedené lineární materiály pukliny. Zapsány jsou minimální a maximální hodnoty pro celou délku pukliny. Pro všechny modely se puklina více či méně zužuje – změny šířky jsou záporná čísla. Na první pohled můžeme vidět, že změna šířky pro materiál pukliny „Puklina 2“ je přibližně desetkrát vyšší než pro materiál „Puklina 1“, důvodem je poměr modulů pružnosti, který je také roven hodnotě deset. Pro materiál pukliny „Puklina 1“ dosahuje většinou hodnot v řádu 10^{-4} m, pro materiál „Puklina 2“ přibližně hodnot v řádu 10^{-3} m. Z tabulky můžeme dále zjistit, že modely, které mají předepsanou vyšší hodnotu tlaku seshora a zdola než z boků, vykazují větší rozptyl změny šířky. Pro případy s vyšším tlakem z boků se hodnoty změny rozevření pukliny pro všechny elementy přibližně rovnají. Z kvantitativního hlediska dosahují nejvyšší změny šířky modely, které jsou zatíženy 26 MPa z boků. (Při porovnání „Zatížení O2“, které je zatíženo 26 MPa z boků, a „Zatížení O3“, kde je předepsaná stejná hodnota tlaku seshora a zdola, vidíme, že se puklina více zúží pro tlakové zatížení z boku).

I pro změnu šířky můžeme ověřit princip superpozice, který by měl pro lineární materiál platit. Vezmeme například „Zatížení 1“ a „Zatížení 4“, jejichž součet by měl dát změnu šířky „Zatížení 3“. Číselně vyjádříme součet podle vztahů (42) až (44) (budeme brát maximální hodnoty v absolutní hodnotě pro materiál „Puklina 1“, protože jsou typické pro většinu uzlů v puklině). Spočtená hodnota se liší od hodnoty z tabulky zhruba o 2%. Pro materiál „Puklina 2“ je situace podobná, hodnoty se liší o 1,1%.

$$\Delta b_{\text{Zatížení 3}} = 4,11 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad (42)$$

$$\Delta b_{\text{spoč}} = \Delta b_{\text{Zatížení 1}} + \Delta b_{\text{Zatížení 4}} \quad (43)$$

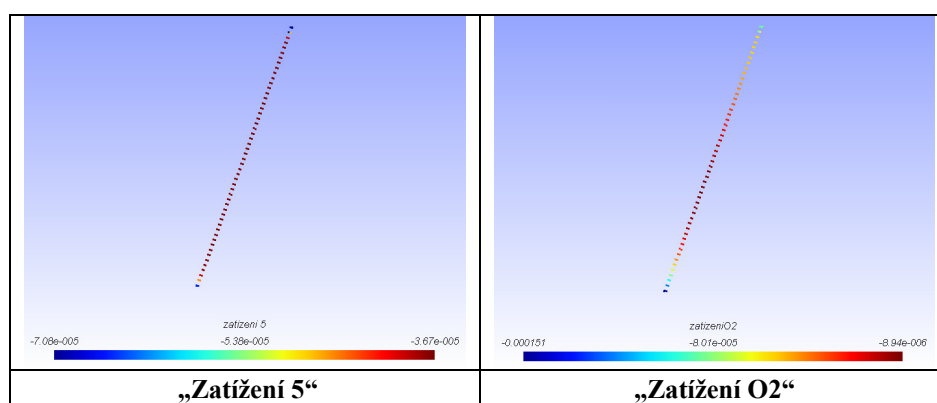
$$\Delta b_{\text{spoč}} = -3,54 \cdot 10^{-5} - 3,83 \cdot 10^{-4} = 4,184 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad (44)$$

Dále by mělo platit, že modely s upevněním z boku modelu („Zatížení O2“ a „Zatížení O3“) by měly odpovídat modelům shodně zatíženým s upevněním dole („Zatížení 5“ resp. „Zatížení 4“). Porovnáváme opět modely s materiálem pukliny „Puklina 1“. Rozdíly ve změně šířky u „Zatížení 4“ a „Zatížení O3“ nejsou opět velké (asi 2%), pro „Zatížení 5“ a „Zatížení O2“ jsou rozdíly mnohem vyšší (přes 50%). Příčinou je upevnění z boku pro model „Zatížení O2“, které způsobuje vyšší rozptyl změny šířky v rámci jednoho modelu, změna šířky se mění plynule od jedné krajní hodnoty ke druhé, a proto nelze dost dobře určit odchylku obou modelů. Obrázky

s těmito dvěma zatíženími pro lineární materiál „Puklina 1“ jsou uvedeny na Obr. 21. U „Zatížení O2“ je dobře zřetelný větší rozptyl hodnot změny šířky, naopak u „Zatížení 5“ jsou hodnoty změny šířky vyznačeny červenou barvou, pouze krajní uzly modrou, což je nejspíše způsobeno nespojitostmi, který vycházely u úlohy napjatosti v Ansysu při okrajích pukliny.

Tab. 10 – Změna rozevření pukliny pro lineární materiály pukliny („Puklina 1“ a „Puklina 2“)

označení zatížení	popis zatížení (předepsané tlaky)	změna rozevření pukliny [m]			
		Puklina 1		Puklina 2	
		min	max	min	max
1	13 MPa nahoře a dole	-3,54E-05	-1,84E-05	-3,26E-04	-2,38E-03
2	26 MPa nahoře a dole 13 MPa z boků	-2,57E-04	-2,28E-04	-2,52E-03	-2,38E-03
3	13 MPa nahoře a dole 26 MPa z boků	-4,11E-04	-4,01E-04	-4,09E-03	-4,05E-03
4	26 MPa z boků	-3,83E-04	-3,73E-04	-3,81E-03	-3,74E-03
5	26 MPa nahoře a dole	-7,08E-05	-3,67E-05	-6,52E-04	-4,76E-04
6	26 MPa nahoře a dole 26 MPa z boků	-4,44E-04	-4,19E-04	-4,39E-03	-4,28E-03
O2	26 MPa nahoře a dole	-1,51E-04	-8,94E-06	-1,03E-03	-3,01E-04
O3	26 MPa z boků	-3,91E-04	-3,52E-04	-3,86E-03	-3,66E-03



Obr. 21 – Změna šířky pro lineární materiál „Puklina 1“

5.2.2 Lineární ($E = 15 \text{ MPa}$) a nelineární materiál pukliny

Další modely, pro něž jsme zkoumali změnu šířky, jsou modely s materiálem pukliny s modulem pružnosti 3000×nižším než je modul pružnosti horniny a dále model s nelineárním materiálem pukliny.

Protože se v prvním případě jedná opět o lineární materiál, kvalitativní vlastnosti odpovídají modelům v minulé kapitole. Například nejvyšší změny šířky dosáhly opět modely s vyšším bočním tlakem. Dále znovu platí princip superpozice, i když tato vlastnost není z tabulky přímo jasná. Pro některá zatížení, změna šířky

dokonce přesáhla původní šířku, což není ve skutečnosti možné a jen to dokazuje limity lineárního materiálu.

Abychom chování pukliny přiblížili ke skutečnému chování reálné horniny, použijeme materiál s nelineárními vlastnostmi, který je „měkčí“ pro nižší hodnoty normálového napětí a naopak pevnější pro vyšší hodnoty napětí. Model tohoto materiálu vychází z reálně naměřených hodnot pro rozpukanou horninu. Uvedené vlastnosti můžeme doložit porovnáním několika modelů, které jsou uvedeny v Tab. 11. Pro oba materiály platí, že je změna šířky pukliny v řádu centimetrů a opět v záporných hodnotách. Pro nižší velikosti tlaků ze stran („Zatížení 4a“, „Zatížení O3a“) si velikosti změny šířky víceméně odpovídají. Ale když se podíváme na výsledky pro vyšší předepsané tlaky, je zřejmé, že se více liší. Nejlépe je tato vlastnost patrná pro zatížení, kde u lineárního materiálu změna šířky přesáhla původní šířku pukliny, ale u odpovídajícího zatížení u nelineárního materiálu vyšla změna šířky vždy do hodnoty 8,64 cm, což je šířka nezatíženého bloku horniny. Avšak i pro nelineární materiál platí, že nejvyšší zúžení pukliny dosáhly modely s vyšším bočním tlakem, nejvyšší ze všech pro předepsaných 26 MPa ze všech čtyřech stran, konkrétně asi 7,8 cm. Nejméně se uzavřela puklina u „Zatížení 1“ a „Zatížení O3a“, kde je předepsáno 13 MPa nahoře a dole.

Tab. 11 – Změna šířky pukliny pro lineární ($E = 15 \text{ MPa}$) a nelineární mat.pukliny

označení zatížení	popis zatížení (předepsané tlaky)	změna rozevření pukliny [m]			
		lineární materiál $E = 15 \text{ MPa}$		nelineární materiál	
		min	max	min	max
1	13 MPa nahoře a dole	-8,35E-03	-7,52E-03	-1,01E-02	-9,14E-03
2	26 MPa nahoře a dole 13 MPa z boků	-7,30E-02	-7,21E-02	-6,03E-02	-5,95E-02
3	13 MPa nahoře a dole 26 MPa z boků	přesáhlo původní šířku		-7,24E-02	-7,20E-02
4	26 MPa z boků	přesáhlo původní šířku		-6,04E-02	-5,96E-02
4a	13 MPa z boků	-5,70E-02	-5,63E-02	-5,33E-02	-5,26E-02
5	26 MPa nahoře a dole	-1,67E-02	-1,50E-02	-1,21E-02	-1,09E-02
6	26 MPa nahoře a dole 26 MPa z boků	přesáhlo původní šířku		-7,83E-02	-7,81E-02
O2	26 MPa nahoře a dole	-1,72E-02	-1,46E-02	-1,24E-02	-1,05E-02
O2a	13 MPa nahoře a dole	-8,61E-03	-7,31E-03	-1,04E-02	-8,93E-03
O3	26 MPa z boků	přesáhlo původní šířku		-6,05E-02	-5,94E-02
O3a	13 MPa z boků	-5,71E-02	-5,62E-02	-5,33E-02	-5,25E-02

5.3 Změna hydraulické vodivosti a toku pro různé poměry tlaků

V poslední části se budeme zabývat vlivem různých poměrů tlaků na změnu hydraulické vodivosti a následně na tok blokem horniny s jednou puklinou. V této úloze jsme počítali pouze s modelem s nelineárním materiálem pukliny, blok je upevněn dole a zatěžovali jsme ho různým poměrem tlaků (1:0; 1:1; 1:2; 1:3; 1:4,6 a opačně – konkrétní velikosti tlaků jsou uvedeny v Tab. 12), což prakticky znamená tyto dva způsoby zatížení:

- konstantní tlak z boků (na blok působí konstantní boční tlak 13 MPa, mění se zatížení z horní a dolní strany modelu od 0 do 60 MPa, pro tento model jsme počítali dvě varianty upevnění – upevnění zdola (dále označeno „konstantní tlak z boků 1“) a upevnění z boku (dále označeno „konstantní tlak z boků 2“), obě upevnění jsou popsána v kapitole 4.1.2)
- konstantní tlak nahoře a dole (na blok horniny je předepsán konstantní tlak 13 MPa nahoře a dole, mění se boční tlak z 0 do 60 MPa).

V Tab. 12 jsou zapsány velikosti předepsaných napětí (poměry tlaků). Poměr tlaků je zaznamenán pro obě výše popsané varianty: tlak seshora a zdola ku tlaku z boků a opačně.

Tab. 12 – Poměry napětí z boků a seshora a zdola a opačně

označení zatížení	popis	poměr tlaků
13-0	13 MPa : 0 MPa	1:0
13-13	13 MPa : 13 MPa	1:1
13-26	13 MPa : 26 MPa	1:2
13-30	13 MPa : 39 MPa	1:3
13-60	13 MPa : 60 MPa	1:4,6

5.3.1 Vyhodnocení

Grafy závislosti velikosti změněné šířky, hydraulické vodivosti a toku horninou na velikosti zatížení jsou uvedeny na Obr. 22 až Obr. 24. Na vodorovné ose jsou znázorněny poměry kolmých napětí (pro všechny tři varianty zatížení), navíc je podle typu grafu vykreslena i odpovídající veličina pro nezatíženou horninu. Na první pohled je zřejmé, že tvary průběhů na všech třech grafech, jsou shodné pro zatížení, která si odpovídají. Tato vlastnost vyplývá ze skutečnosti, že hydraulická vodivost a následně i tok závisí na druhé mocnině šířky pukliny.

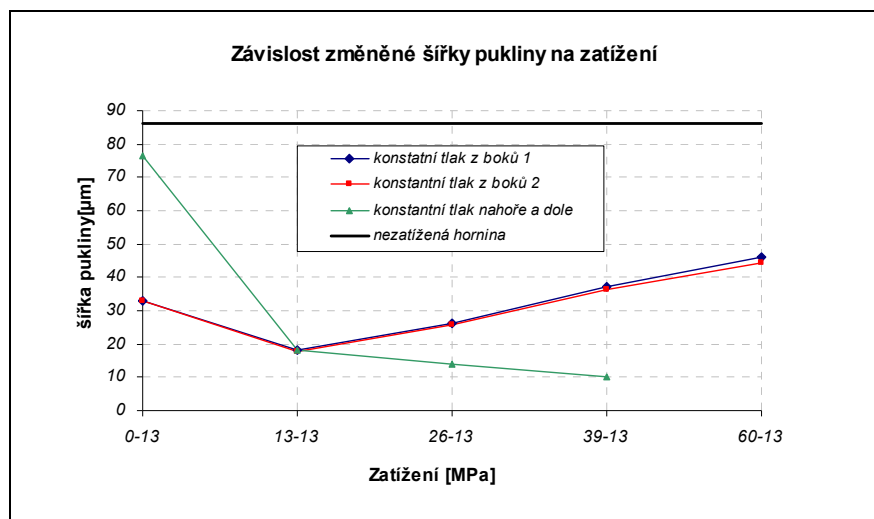
Z důvodu popsaném v minulém odstavci stačí vlastnosti popsat na grafu na Obr. 22 (průběh změněné šířky v závislosti na zatížení), hydraulická vodivost a tok se budou chovat analogicky. Grafy průběhu těchto veličin jsou uvedeny, abychom získali představu o jejich konkrétních velikostech.

Pro nezatíženou horninu je velikost šířky pukliny 86,4 μm . Pro zatížení označené „konstantní tlak nahoře a dole“ se šířka pro napětí 13-13 MPa zmenšila na 18 μm , pro větší zatížení šířka klesá, pouze však pozvolněji (pro zatížení 13-39 MPa klesla na 10,3 μm). Zatížení označená „konstantní tlak z boků 1“ a „konstantní tlak z boků 2“ se překrývají, důvodem je skutečnost, že se jedná o shodné modely, pouze jinak upevněné. Shodnost průběhů zároveň dokazuje, že si tyto dvě varianty upevnění odpovídají. Pro obě zatížení typu konstantní tlak z boků platí, že se nejprve šířka pukliny snižuje (pro zatížení 13-13 MPa dosáhla šířka stejné hodnoty jako v minulém případě: 18 μm , pro narůstající tlak seshora a zdola se šířka opět trochu zvyšuje až na hodnotu 45,9 μm pro zatížení 13-60 MPa.

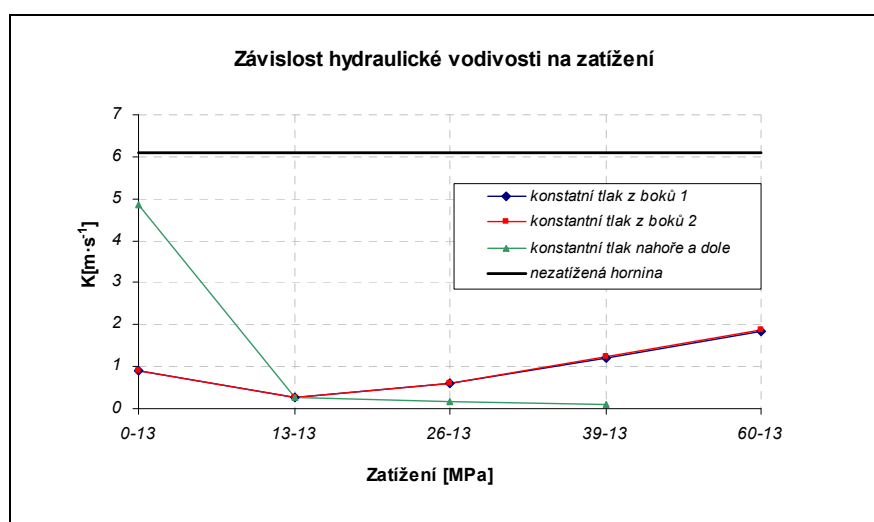
Chování popsané pro uvedené typy tlakových zatížení odpovídá reálnému chování horniny a můžeme jej shrnout takto: tlaky, které působí v přibližně normálovém směru na puklinu, tuto puklinu uzavírají a tlaky působící zhruba ve směru pukliny, puklinu nejprve zúží a při dalším zvyšování tlaku znovu rozšiřují. Porovnání konkrétních hodnot veličin z grafů je uvedeno pro „konstantní tlak nahoře a dole“ a pro „konstantní tlak z boků 1“ v Tab. 13.

Tab. 13 – Vyhodnocení různých poměrů normálových zatížení

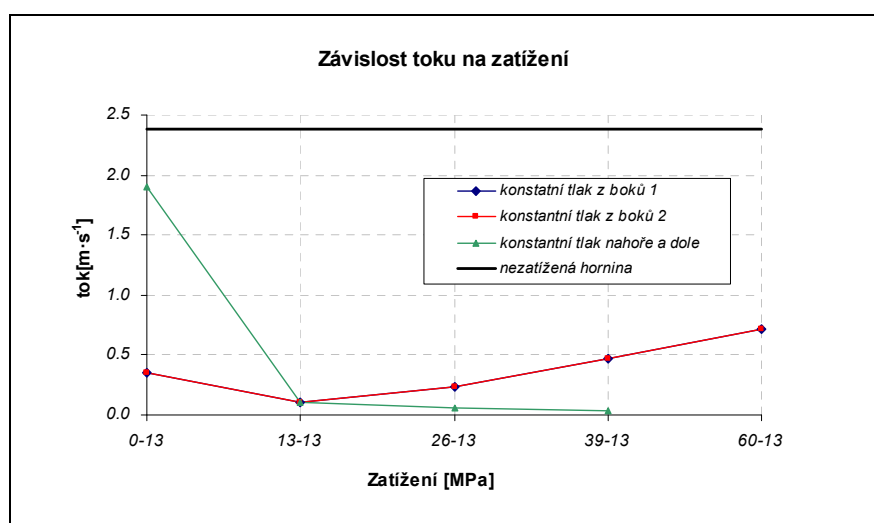
zatížení	konstantní tlak z boků 1 upevnění dole			konstantní tlak nahoře a dole		
	změněná šířka [μm]	K [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	tok [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	změněná šířka [μm]	K [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	tok [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
0-0	86,4	6,09E+00	2,38E+00	86,4	6,09E+00	2,38E+00
13-0	33,1	8,96E-01	3,51E-01	76,3	4,87E+00	1,90E+00
13-13	18,0	2,68E-01	1,05E-01	18,0	2,68E+00	1,05E-01
13-26	26,1	5,88E-01	2,30E-01	14,0	1,61E-01	6,33E-02
13-39	37,3	1,21E+00	4,70E-01	10,3	8,70E-02	3,42E-02
13-60	45,9	1,84E+00	7,17E-01	nepočítáno		



Obr. 22 – Graf závislosti změněné šířky pukliny na zatížení, hodnoty na vodorovné ose odpovídají aplikovaným poměrům zatížení



Obr. 23 – Graf závislosti hydraulické vodivosti na zatížení, hodnoty na vodorovné ose odpovídají aplikovaným poměrům zatížení



Obr. 24 – Graf závislosti toku horninou na zatížení, hodnoty na vodorovné ose odpovídají aplikovaným poměrům zatížení

Závěr

Úkolem diplomové práce bylo řešení sdružených úloh napjatosti a proudění pro rozpukanou horninu. Měli jsme popsat chování horniny s puklinami zatížené různými napětími a vliv na hydraulickou vodivost. Přitom jsme pukliny aproximovali tzv. měkkým materiálem. Postupovali jsme ve třech oddělených krocích, které jsou však spolu silně provázány – (1) úloha napjatosti, (2) transformace pole posunutí do změny rozevření pukliny a hydraulické vodivosti, (3) úloha proudění.

Nejprve bylo nutné vyřešit úlohu napjatosti na 2D modelu horniny s jednou puklinou, kterou jsme modelovali v konečně-prvkovém systému Ansys. Vyzkoušeli jsme použití několika lineárních materiálů a jednoho nelineárního. Při zatěžování modelu různými velikostmi kolmých tlaků jsme získali přehled o rozložení napětí v hornině s puklinou, velikosti deformací a také pole posunutí, které jsme využili v další části. Pro modely platí, že díky nižšímu modulu pružnosti se puklina deformuje daleko více než hornina, což odpovídá skutečnosti.

Šířka pukliny vypočtená pomocí skriptu vytvořeného v rámci transformace v Matlabu se pro všechna zatížení více či méně zužuje oproti své původní šířce. K vyššímu zúžení dochází pro tlak předepsaný z bočních stran modelu, než pro tlak nahoře a dole. Nelineární model materiálu horniny více odpovídá skutečnému chování pukliny: ani pro vyšší hodnoty předepsaného tlaku nedošlo k nereálnému uzavření pukliny, jak se stalo pro jeden z lineárních materiálů. Tato skutečnost ukazuje limity pro užití lineárního materiálu a vhodnost užití přesnějšího, nelineárního materiálu pukliny.

Třetí část zahrnuje výpočet úlohy proudění v programu Flow123D s modelovými okrajovými podmínkami, s využitím spočítané hydraulické vodivosti. V rámci této úlohy jsme vytvořili sadu úloh s puklinou s nelineárním materiálem, kde jsme předepsali různé poměry tlaků od 1:0 do 1:4,6 a opačně. Pro zatížení, kde se zvyšoval tlak ze stran, dochází k postupnému zužování pukliny. Pro opačné zatížení s rostoucím tlakem nahoře a dole dojde pro nižší tlaky k zúžení pukliny, při dalším zvyšování se puklina opět mírně rozšiřuje, ale stále zůstává oproti původnímu stavu uzavřená. Toto chování potvrzuje správnost modelu, protože takto se chová i reálná rozpukaná hornina.

Dále bychom mohli na práci navázat a vytvořit obdobné modely pro složitější puklinovou síť, zdokonalit materiálový model pukliny. Případně bychom mohli vylepšit skript pro transformaci, vytvořit ho přímo v rámci systému Ansys.

Přílohy

Příloha A Skript přepočítávající pole posunutí do změny rozevření pukliny

```
%pocita zmenu sirky pukliny..uzly v pukline musi byt presne naproti
sobe(spojnice dvou uzlu naproti sobe je kolma na osu pukliny)
sirka=8.64E-02;
nody = dlmread('vystupAnsyst.txt');
elementy = dlmread('vystupElemAnsyst.txt');
mi=0.001002;
ro=1000;
g=9.81;

N=length(elementy);
M=length(nody);
n=0;
for i=1:N
    if(elementy(i,5)==2)
        n=n+1;
    end
end
elem=0;

%priprava promenne elem
for i=1:M
    nody(i,6)=i;
end

for i=1:N
    elem(i,1)=elementy(i,1);
    elem(i,2)=elementy(i,2);
    elem(i,7)=elementy(i,3);
    elem(i,12)=elementy(i,4);
end

for i=1:N
    for j=1:M
        if (elem(i,2)==nody(j,6))
            elem(i,3)=nody(j,1);
            elem(i,4)=nody(j,2);
            elem(i,5)=nody(j,4);
            elem(i,6)=nody(j,5);
        end

        if (elem(i,7)==nody(j,6))
            elem(i,8)=nody(j,1);
            elem(i,9)=nody(j,2);
            elem(i,10)=nody(j,4);
            elem(i,11)=nody(j,5);
        end

        if (elem(i,12)==nody(j,6))
            elem(i,13)=nody(j,1);
            elem(i,14)=nody(j,2);
            elem(i,15)=nody(j,4);
            elem(i,16)=nody(j,5);
        end
    end
end

%vyber uzlu naproti sobe
for m = 1:n
    matPukl(m,1)=0;
    vzdal(1)=abs(sirka-sqrt((elem(m,9)-elem(m,4))^2+(elem(m,8)-
elem(m,3))^2));
    vzdal(2)=abs(sirka-sqrt((elem(m,14)-elem(m,4))^2+(elem(m,13)-
elem(m,3))^2));
    vzdal(3)=abs(sirka-sqrt((elem(m,14)-elem(m,9))^2+(elem(m,13)-
elem(m,8))^2));
    minimum=min(vzdal);
    if (abs(minimum-vzdal(1))<=0)
        vybr(m,1)=1;
    elseif (abs(minimum-vzdal(2))<=0)
        vybr(m,1)=2;
    else
        vybr(m,1)=3;
    end
end
```

```
%pocita zmenu sirky pukliny
for m = 1:n
    if (vybr(m,1)==1)
        if(elem(m,3)>elem(m,8))
            kx=elem(m,3)-elem(m,8);
            ky=elem(m,4)-elem(m,9);
            Bkol(m,1)=(((elem(m,5)-elem(m,10))*kx)+((elem(m,6)-
elem(m,11))*ky))/(sqrt((kx*kx)+(ky*ky)));
        else
            kx=elem(m,8)-elem(m,3);
            ky=elem(m,9)-elem(m,4);
            Bkol(m,1)=(((elem(m,10)-elem(m,5))*kx)+((elem(m,11)-
elem(m,6))*ky))/(sqrt((kx*kx)+(ky*ky)));
        end
    end

    if (vybr(m,1)==2)
        if(elem(m,3)>elem(m,13))
            kx=elem(m,3)-elem(m,13);
            ky=elem(m,4)-elem(m,14);
            Bkol(m,1)=(((elem(m,5)-elem(m,15))*kx)+((elem(m,6)-
elem(m,16))*ky))/(sqrt((kx*kx)+(ky*ky)));
        else
            kx=elem(m,13)-elem(m,3);
            ky=elem(m,14)-elem(m,4);
            Bkol(m,1)=(((elem(m,15)-elem(m,5))*kx)+((elem(m,16)-
elem(m,6))*ky))/(sqrt((kx*kx)+(ky*ky)));
        end
    end

    if (vybr(m,1)==3)
        if(elem(m,8)>elem(m,13))
            kx=elem(m,8)-elem(m,13);
            ky=elem(m,9)-elem(m,14);
            Bkol(m,1)=(((elem(m,10)-elem(m,15))*kx)+((elem(m,11)-
elem(m,16))*ky))/(sqrt((kx*kx)+(ky*ky)));
        else
            kx=elem(m,13)-elem(m,8);
            ky=elem(m,14)-elem(m,9);
            Bkol(m,1)=(((elem(m,15)-elem(m,10))*kx)+((elem(m,16)-
elem(m,11))*ky))/(sqrt((kx*kx)+(ky*ky)));
        end
    end
end

%pocita materil pukliny pro Flow123D
for m = 1:n
    b(m,1)=sirka+Bkol(m,1);
    if (b(m,1)<0)
        K(m,1)=0.01;
    else
        K(m,1)=(b(m,1)*b(m,1)*ro*g)/(12*mi);
    end
end

%prirazuje elementum zmenu sirky pukliny
for m=1:n+2
    uzlyPukl(m,1)=m;
end

for m = 1:n
    if (vybr(m,1)==1)
        vybr1(m,1)=elem(m,2);
        vybr1(m,2)=elem(m,7);
        vybr1(m,3)=elem(m,12);
    end
    if (vybr(m,1)==2)
        vybr1(m,1)=elem(m,2);
        vybr1(m,2)=elem(m,12);
        vybr1(m,3)=elem(m,7);
    end
    if (vybr(m,1)==3)
        vybr1(m,1)=elem(m,7);
        vybr1(m,2)=elem(m,12);
        vybr1(m,3)=elem(m,2);
    end
end
```

```

end
uzlyPukl(:,2)=0;
uzlyPukl(:,3)=0;
uzlyPukl(:,4)=0;
for m = 1:n
    for k = 1:(length(uzlyPukl))
        if (((vybr1(m,1)==uzlyPukl(k,1)))&(uzlyPukl(k,4)==0))
            uzlyPukl(k,4)=Bkol(m,1);
        elseif (((vybr1(m,2)==uzlyPukl(k,1)))&(uzlyPukl(k,4)==0))
            uzlyPukl(k,4)=Bkol(m,1);
        elseif (((vybr1(m,3)==uzlyPukl(k,1)))&(uzlyPukl(k,4)==0))
            uzlyPukl(k,4)=Bkol(m,1);
        end
    end
end
uzlyPukl(:,5)=0;
for m = 1:n
    for k = 1:(length(uzlyPukl))
        if (((vybr1(m,1)==uzlyPukl(k,1)))&(uzlyPukl(k,5)==0))
            uzlyPukl(k,5)=K(m,1);
        elseif (((vybr1(m,2)==uzlyPukl(k,1)))&(uzlyPukl(k,5)==0))
            uzlyPukl(k,5)=K(m,1);
        elseif (((vybr1(m,3)==uzlyPukl(k,1)))&(uzlyPukl(k,5)==0))
            uzlyPukl(k,5)=K(m,1);
        end
    end
end
for m = 1:n
    for k = 1:(length(uzlyPukl))
        if (((elem(m,2)==uzlyPukl(k,1)))&(uzlyPukl(k,2)==0))
            uzlyPukl(k,2)=elem(m,3);
            uzlyPukl(k,3)=elem(m,4);
        elseif (((elem(m,7)==uzlyPukl(k,1)))&(uzlyPukl(k,2)==0))
            uzlyPukl(k,2)=elem(m,8);
            uzlyPukl(k,3)=elem(m,9);
        elseif (((elem(m,12)==uzlyPukl(k,1)))&(uzlyPukl(k,2)==0))
            uzlyPukl(k,2)=elem(m,13);
            uzlyPukl(k,3)=elem(m,14);
        end
    end
end
vybr1(:,4)=0;
vybr1(:,5)=0;
vybr1(:,6)=0;
for m=1:n
    for k=1:length(uzlyPukl)
        if (vybr1(m,1)==uzlyPukl(k,1)&(vybr1(m,4)==0))
            vybr1(m,4)=uzlyPukl(k,4);
        elseif(vybr1(m,2)==uzlyPukl(k,1)&(vybr1(m,5)==0))
            vybr1(m,5)=uzlyPukl(k,4);
        elseif(vybr1(m,3)==uzlyPukl(k,1)&(vybr1(m,6)==0))
            vybr1(m,6)=uzlyPukl(k,4);
        end
    end
end
vybr1(:,7)=0;
vybr1(:,8)=0;
vybr1(:,9)=0;
for m=1:n
    for k=1:length(uzlyPukl)
        if (vybr1(m,1)==uzlyPukl(k,1)&(vybr1(m,7)==0))
            vybr1(m,7)=uzlyPukl(k,5);
        elseif(vybr1(m,2)==uzlyPukl(k,1)&(vybr1(m,8)==0))
            vybr1(m,8)=uzlyPukl(k,5);
        elseif(vybr1(m,3)==uzlyPukl(k,1)&(vybr1(m,9)==0))
            vybr1(m,9)=uzlyPukl(k,5);
        end
    end
end
for m=1:n
    zmenaEl(m,1)=(2*vybr1(m,4)+(2*vybr1(m,5)+vybr1(m,6))/5;
    KF123D(m,1)=(2*vybr1(m,7)+(2*vybr1(m,8)+vybr1(m,9))/5;
end
fid = fopen('zmenaSirky.pos','w');
fprintf(fid,'View "zatizeni" \n');
for d=1:(n+2)
    fprintf(fid,'SP(%12.16f;%12.16f,0){%12.16f};\n',uzlyPukl(d,2),
        uzlyPukl(d,3),uzlyPukl(d,4));
end
fprintf(fid,'}');
fclose(fid);
fid = fopen('jednaPukl.mtr','w');
fprintf(fid,'%MaterialFormat\n1.008\n$EndMaterialFormat\n$Materials\n%.0f\n',n+1);
for d=1:n
    fprintf(fid,'%4.0ft^2\t1t^%.16fn',d+1000,KF123D(d,1));
end
fprintf(fid,'\t1t^0.01n$EndMaterials\n',d+1000,KF123D(d,1));
fprintf(fid,'%Geometry\n');
for d=1:n
    fprintf(fid,'%4.0ft^2\t1n',d+1000);
end
fprintf(fid,'\t1t^1n$EndGeometry');
fclose(fid);
fid = fopen('jednaPukl.msh','w');
fprintf(fid,'%MeshFormat\n208\n$EndMeshFormat\n$Nodes\n%.0fn',M);
for d=1:M
    fprintf(fid,'%6.0ft^%.16ft^%.16ft^0\n',d,nody(d,1),nody(d,2));
end
fprintf(fid,'%EndNodes\n$Elements\n%.0fn',N);
for d=1:n
    fprintf(fid,'%4.0ft^2\t2t^%.4.0ft^%.4.0ft^%.4.0ft^%.4.0fn',d,
        d+1000,d+1000,elementy(d,2),elementy(d,3),elementy(d,4));
end
for d=(n+1):N
    fprintf(fid,'%4.0ft^2\t2t^1t^%.4.0ft^%.4.0ft^%.4.0fn',d,elementy(d,2),
        elementy(d,3),elementy(d,4));
end
fprintf(fid,'%EndElements');
fclose(fid);

```

Příloha B Skript z Ansysu v jazyce APDL pro výpočet modelu s jednou puklinou s lineárním materiálem pukliny

```

/PREP7
ET,1,PLANE42
KEYOPT,1,3,2
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,4.5E10
MPDATA,PRXY,1,,0.23
MPDATA,DENSITY,1,,2700
KEYOPT,1,3,2
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,4.5E9
MPDATA,PRXY,2,,0.23
MPDATA,DENSITY,2,,2700

K,1,6,6,0
K,2,6,-6,0
K,3,-1.95403,-6,0
K,4,-2.04597,-6,0
K,5,-6,-6,0
K,6,-6,6,0
K,7,2.32163,6,0
K,8,2.41357,6,0
K,100,0,0,0

LOCAL,11,0,2.3676,6,0,-110,
,1,1,

CSYS,11
K,9,0.016733,0.0432,0

K,11001,0.25,0.0432,0
K,11002,0.5,0.0432,0
K,11003,0.75,0.0432,0
K,11004,1,0.0432,0
K,11005,1.25,0.0432,0
K,11006,1.5,0.0432,0
K,11007,1.75,0.0432,0
K,11008,2,0.0432,0
K,11009,2.25,0.0432,0
K,11010,2.5,0.0432,0
K,11011,2.75,0.0432,0
K,11012,3,0.0432,0
K,11013,3.25,0.0432,0
K,11014,3.5,0.0432,0
K,11015,3.75,0.0432,0
K,11016,4,0.0432,0
K,11017,4.25,0.0432,0
K,11018,4.5,0.0432,0
K,11019,4.75,0.0432,0
K,11020,5,0.0432,0
K,11021,5.25,0.0432,0
K,11022,5.5,0.0432,0
K,11023,5.75,0.0432,0
K,11024,6,0.0432,0
K,11025,6.25,0.0432,0
K,11026,6.5,0.0432,0
K,11027,6.75,0.0432,0
K,11028,7,0.0432,0
K,11029,7.25,0.0432,0
K,11030,7.5,0.0432,0
K,11031,7.75,0.0432,0
K,11032,8,0.0432,0
K,11033,8.25,0.0432,0
K,11034,8.5,0.0432,0
K,11035,8.75,0.0432,0
K,11036,9,0.0432,0
K,11037,9.25,0.0432,0
K,11038,9.5,0.0432,0
K,11039,9.75,0.0432,0
K,11040,10,0.0432,0
K,11041,10.25,0.0432,0
K,11042,10.5,0.0432,0
K,11043,10.75,0.0432,0
K,11044,11,0.0432,0
K,11045,11.25,0.0432,0
K,11046,11.5,0.0432,0
K,11047,11.75,0.0432,0
K,11048,12,0.0432,0
K,11049,12.25,0.0432,0

K,11050,12.5,0.0432,0
K,11051,0.25,-0.0432,0
K,11052,0.5,-0.0432,0
K,11053,0.75,-0.0432,0
K,11054,1,-0.0432,0
K,11055,1.25,-0.0432,0
K,11056,1.5,-0.0432,0
K,11057,1.75,-0.0432,0
K,11058,2,-0.0432,0
K,11059,2.25,-0.0432,0
K,11060,2.5,-0.0432,0
K,11061,2.75,-0.0432,0
K,11062,3,-0.0432,0
K,11063,3.25,-0.0432,0
K,11064,3.5,-0.0432,0
K,11065,3.75,-0.0432,0
K,11066,4,-0.0432,0
K,11067,4.25,-0.0432,0
K,11068,4.5,-0.0432,0
K,11069,4.75,-0.0432,0
K,11070,5,-0.0432,0
K,11071,5.25,-0.0432,0
K,11072,5.5,-0.0432,0
K,11073,5.75,-0.0432,0
K,11074,6,-0.0432,0
K,11075,6.25,-0.0432,0
K,11076,6.5,-0.0432,0
K,11077,6.75,-0.0432,0
K,11078,7,-0.0432,0
K,11079,7.25,-0.0432,0
K,11080,7.5,-0.0432,0
K,11081,7.75,-0.0432,0
K,11082,8,-0.0432,0
K,11083,8.25,-0.0432,0
K,11084,8.5,-0.0432,0
K,11085,8.75,-0.0432,0
K,11086,9,-0.0432,0
K,11087,9.25,-0.0432,0
K,11088,9.5,-0.0432,0
K,11089,9.75,-0.0432,0
K,11090,10,-0.0432,0
K,11091,10.25,-0.0432,0
K,11092,10.5,-0.0432,0
K,11093,10.75,-0.0432,0
K,11094,11,-0.0432,0
K,11095,11.25,-0.0432,0
K,11096,11.5,-0.0432,0
K,11097,11.75,-0.0432,0
K,11098,12,-0.0432,0
K,11099,12.25,-0.0432,0
K,11100,12.5,-0.0432,0
K,11101,12.7544,-0.0432,0

CSYS,0
DSYS,11
!KLIST
DSYS,0

A,7,8,9
A,11001,11051,7,9
A,11001,11002,11052,11051
A,11002,11003,11053,11052
A,11003,11004,11054,11053
A,11004,11005,11055,11054
A,11005,11006,11056,11055
A,11006,11007,11057,11056
A,11007,11008,11058,11057
A,11008,11009,11059,11058
A,11009,11010,11060,11059
A,11010,11011,11061,11060
A,11011,11012,11062,11061
A,11012,11013,11063,11062
A,11013,11014,11064,11063
A,11014,11015,11065,11064
A,11015,11016,11066,11065
A,11016,11017,11067,11066
A,11017,11018,11068,11067
A,11018,11019,11069,11068

A,11019,11020,11070,11069
A,11020,11021,11071,11070
A,11021,11022,11072,11071
A,11022,11023,11073,11072
A,11023,11024,11074,11073
A,11024,11025,11075,11074
A,11025,11026,11076,11075
A,11026,11027,11077,11076
A,11027,11028,11078,11077
A,11028,11029,11079,11078
A,11029,11030,11080,11079
A,11030,11031,11081,11080
A,11031,11032,11082,11081
A,11032,11033,11083,11082
A,11033,11034,11084,11083
A,11034,11035,11085,11084
A,11035,11036,11086,11085
A,11036,11037,11087,11086
A,11037,11038,11088,11087
A,11038,11039,11089,11088
A,11039,11040,11090,11089
A,11040,11041,11091,11090
A,11041,11042,11092,11091
A,11042,11043,11093,11092
A,11043,11044,11094,11093
A,11044,11045,11095,11094
A,11045,11046,11096,11095
A,11046,11047,11097,11096
A,11047,11048,11098,11097
A,11048,11049,11099,11098
A,11049,11050,11100,11099
A,11050,3,11101,11100
A,3,4,11101

A,1,8,9,11001,11002,11003,110
04,11005,11006,11007,11008,1
1009,11010,11011,11012,11013
,11014
A,1,11014,11015,11016,11017,1
1018,11019,11020,11021,11022
,11023,11024,11025,11026,110
27
A,1,11027,11028,11029,11030,1
1031,11032,11033,11034,11035
,11036,11037,11038,11039,110
40
A,1,11040,11041,11042,11043,1
1044,11045,11046,11047,11048
,11049,11050,3,2

AADD,54,55,56,57

A,6,7,11051,11052,11053,11054
,11055,11056,11057,11058,110
59,11060,11061,11062,11063,1
1064
A,6,11064,11065,11066,11067,1
1068,11069,11070,11071,11072
,11073,11074,11075,1100

A,6,100,11076,11077,11078,110
79,11080,11081,11082,11083,1
1084,11085,11086,11087,11088
,11089,11090
A,6,11090,11091,11092,11093,1
1094,11095,11096,11097,11098
,11099,11100,11101,4,5
A,100,11076,11075

AADD,54,55,56,57,59
AGLUE,ALL
ASEL,S,AREA,,1,53
AATT,2,,1,0
ASEL,ALL
ASEL,S,AREA,,58,58
AATT,1,,1,0
ASEL,ALL

ASEL,S,AREA,,60,60
AATT,1,,1,0
ASEL,ALL

LESIZE,ALL,0.25
LESIZE,154,0.26
LESIZE,156,0.26
LESIZE,159,0.5
LESIZE,160,0.5
LESIZE,163,0.5
LESIZE,164,0.5
LESIZE,168,0.5
LESIZE,169,0.5
LSEL,ALL
MSHKEY,1,2D
MSHKEY,1
AMESH,2
ASEL,S,,3,51
AMESH,ALL
LESIZE,ALL
MSHKEY,0
AMESH,1
AMESH,53
MSHKEY,1
AMESH,52

/SOLV
LSEL,ALL

DK,2,UX,0
DK,2,UY,0
DK,5,UY,0

SFL,160,PRES,13000000
SFL,1,PRES,13000000
SFL,159,PRES,13000000

SFL,168,PRES,13000000
SFL,163,PRES,13000000
SFL,157,PRES,13000000
SFL,164,PRES,0
SFL,169,PRES,0

SOLVE
/AUTO,1
/REP,FAST

/POST1
/UDOC,1,DATE,0
/REP,FAST

PLNSOL,U,SUM

/SHOW,JPEG,,0
JPEG,QUAL,75,
JPEG,ORIENT,HORIZ
JPEG,COLOR,2
JPEG,TMOD,1
/GFILE,800,
!*
/CMAP,_TEMPCMAP,_CMP,,
SAVE
/RGB,INDEX,100,100,100,0
/RGB,INDEX,0,0,0,15
/REPLOT
/CMAP,_TEMPCMAP,_CMP
/DELETE,_TEMPCMAP,_CMP
/SHOW,CLOSE
/DEVICE,VECTOR,0
!*

```

Příloha C Obsah přiloženého CD

přiložené CD obsahuje počítané modely uspořádané v této struktuře:

- 1_puklina
 - lin_mat (2D modely horniny s jednou puklinou s lineárním materiálem pukliny s modulem pružnosti 10,100 a 3000× nižším než modul pružnosti horniny – různá zatížení)
 - nelin_mat (2D modely horniny s jednou puklinou s nelineárním materiálem pukliny – různá zatížení)
 - nelin_pomery (sady úloh 2D horniny s jednou puklinou s nelineárním materiálem pukliny, různé poměry předepsaných tlaků: konstantní tlak nahoře a dole a konstantní tlak z boků)
 - nezatizeny (2D model horniny s jednou puklinou s předepsaným nulovým tlakem)
- vice_puklin
 - 100xmensiE (2D model horniny s více puklinami s lineárním materiálem pukliny s modulem pružnosti 100× nižším než modul pružnosti horniny)
 - 10xmensiE (2D model horniny s více puklinami s lineárním materiálem pukliny s modulem pružnosti 10× nižším než modul pružnosti horniny)
- ansys_matlab (skripty pro výpis výstupů a k ukládání obrázků z Ansysu a pro výpočet transformace veličin v Matlabu)

Literatura

- [1] Ansys – Analysis Guide, elektronická dokumentace systému Ansys
- [2] Dokumentace k software Flow123D
- [3] D. Mas Ivars: Water inflow into excavations in fractured rock – a three-dimensional hydro-mechanical numerical study, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43 2006, 705-725
- [4] K.B. Min, J. Rutqvist, C.F. Tsang, L. Jing: Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41 2004, 1191-1210
- [5] A. Baghbanan, L. Jing: Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 44 2007, 704–719
- [6] J. Kvasnica, A. Havránek, P. Lukáč, B. Sprášil: Mechanika, Academia, Praha 2004
- [7] J. Horský, J. Novotný, M. Štefaník: Mechanika ve fyzice, Academia, Praha 2001
- [8] J. Valentová: Hydraulika podzemní vody, Nakladatelství ČVUT, Praha 2007
- [9] M. Hokr: Učební texty k předmětu Transportní procesy, TUL
- [10] M. Hokr: Učební texty k předmětu Mechanika pružných těles, TUL
- [11] J. Pruška: Geomechanika a mechanika hornin, Nakladatelství ČVUT, Praha 2002
- [12] J. Klomínský a kol: Geologická a strukturní charakteristika granitoidů z tunelu v Bedřichově v Jizerských horách, SURAO, 2003
- [13] J. Zapletal: Základy geologie, Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc 1995
- [14] V. Horák, A. Paseka, P. Pospíšil: Učební texty k předmětu Mechanika hornin a inženýrská geologie, Ústav geotechniky, VUT Brno
- [15] I. Škarydová: Semestrální projekt: Řešení modelové úlohy vlivu puklin na pole napjatosti v hornině v okolí tunelu, TUL 2007